INVESTIGACION y CIENCIA

FORMACION Y DISGREGACION DE LOS SUPERCONTINENTES

REALIDAD DE LOS MIEMBROS FANTASMA

EL HOMBRE A DEBATE: ¿DE DONDE VENIMOS?



CATALIZADORES ACIDOS SOLIDOS

JUNIO 1992
600 PTAS.



Junio de 1992 Número 189

Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN

SECCIONES

COLABORADORES DE ESTE NUMERO

Asesoramiento y traducción:

Emiliano Aguirre: *Origen africano reciente de los humanos* y *Evolución multirregional de los humanos*; Enrique Martínez: *Las cordilleras de plegamiento y el ciclo supercontinental*; Esteban Santiago: *Superantígenos en la enfermedad humana*; José L. Sánchez Gómez: *El reactor termonuclear experimental internacional*; J. Bartolomé: *Catalizadores ácidos sólidos*; José M. García de la Mora: *Miembros fantasma*; J. Vilardell: *Hace...* ; Angel Garcimartín: *Perfiles*; Shigeko Suzuki: *De cerca*; Luis Bou: *Juegos matemáticos*

Ciencia y sociedad:

José M. García de la Mora, Lluis Cornudella, Juan P. Adrados, J. E. Llebot, J.-D. Ros

Ciencia y empresa:

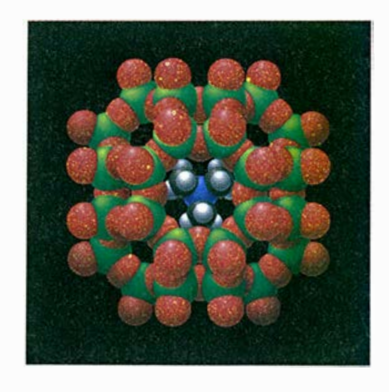
Manuel Puigcerver y Manuel Elices

Libros:

J. E. Beckman, Javier de Lorenzo, Emiliano Aguirre y Luis Alonso

PROCEDENCIA DE LAS ILUSTRACIONES

Página	Fuente
6-7	Jason Goltz
9	Joe LeMonnier (*mapa*), Laurie Grace
10-13	Laurie Grace
15	Peter Yates
16	Milford H. Wolpoff (*arriba*), Patricia J. Wynne, basado en el trabajo de Maria Ostendorf Smith (*abajo*)
17	Milford H. Wolpoff
18-19	Laurie Grace
23-24	Hank Iken
25	Johnny Johnson
26-28	Hank Iken
29	Landsat (*izquierda*), GEOPIC® Earth Satellite Corporation (*derecha*)
37	Luis Cornudella y Expogràfic, S. A.
47	CNRI/Science Photo Library/Photo Researchers, Inc.
48-52	Dana Burns-Pizer
53	Serge Sibert-Odyssey/Matrix
56	Instituto de Investigación de la Energía Atómica de Japón
58-61	Ian Worpole
64	Ashley George y Richard Jones, Royal Institution of Great Britain, y Ruren Xu y Jiesheng Chen, Jilin University, China
66	Johnny Johnson
67	Sir John Meurig Thomas; Stephen D. Pickett, Fundación Imperial para la Investigación sobre el Cáncer
68	Sir John Meurig Thomas; Osamu Terasaki y Robert Millwood, Universidad de Cambridge
69	Sir John Meurig Thomas y C. Richard A. Catlow, Royal Institution; Clive M. Freeman, Biosym Technologies, Inc.
70	Clive M. Freeman y Sir John Meurig Thomas
73-78	Carol Donner
80-86	Vicente Pérez Muñuzuri
92	Kirk Caldwell
93-94	Johnny Johnson



LA PORTADA ilustra un modelo atómico de la zeolita Rho, un catalizador ácido sólido. Estos agentes aceleran las reacciones químicas y permiten obviar la producción de algunos subproductos ambientalmente adversos (véase "Catalizadores ácidos sólidos", por Sir John Meurig Thomas, en este mismo número). La trimetilamina, molécula desechable que ocupa el lugar central, encaja de tal suerte en el poro de Rho, que no puede escapar. Sólo se deja vía libre para las moléculas de metilamina, menores y de interés real. Modelo cedido por David R. Corbin, J. C. Calabrese y Eric Swanson de Du Pont.

INVESTIGACION Y CIENCIA

DIRECTOR GENERAL Francisco Gracia Guillén
DIRECTOR EDITORIAL José María Valderas Gallardo
DIRECTORA DE ADMINISTRACIÓN Pilar Bronchal Garfella
PRODUCCIÓN César Redondo Zayas
M.ª Cruz Iglesias Capón
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
EDITA Prensa Científica, S. A. Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona (ESPAÑA)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48 Telefax 419 47 82

SCIENTIFIC AMERICAN

EDITOR Jonathan Piel
BOARD OF EDITORS Alan Hall, *Executive Editor*; Michelle Press, *Managing Editor*; Timothy M. Beardsley; Elizabeth Corcoran; Deborah Erickson; Marguerite Holloway; John Horgan, *Senior Writer*; Philip Morrison, *Book Editor*; Corey S. Powell; John Rennie; Philip E. Ross; Ricki L. Rusting; Russell Ruthen; Gary Stix; Paul Wallich; Philip M. Yam.
PUBLISHER John J. Moeling, Jr.
ADVERTISING DIRECTOR Robert F. Gregory
PRESIDENT AND CHIEF EXECUTIVE OFFICER Claus-Gerhard Firchow
CHAIRMAN OF THE BOARD Dr. Pierre Gerckens
CHAIRMAN EMERITUS Gerard Piel

SUSCRIPCIONES

Prensa Científica S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª
08029 Barcelona (España)
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48
Fax 419 47 82

Precios de suscripción, en pesetas:

	Un año	Dos años
España	6.600	12.000
Extranjero	7.300	13.400

Ejemplares sueltos:

Ordinario: 600 pesetas
Extraordinario: 775 pesetas

—Todos los precios indicados incluyen el IVA, cuando es aplicable.

— En Canarias, Ceuta y Melilla los precios incluyen el transporte aéreo.

— El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.

DISTRIBUCION

para España:

MIDESA
Carretera de Irún, km. 13,350
(Variante de Fuencarral)
28049 Madrid Tel. 662 10 00

para los restantes países:

Prensa Científica, S. A.
Viladomat, 291 6º 1ª - 08029 Barcelona
Teléfonos 321 81 91 - 321 83 48

PUBLICIDAD

Gustavo Martínez Ovín
Menorca, 8, bajo, centro, izquierda.
28009 Madrid
Tel. 409 70 45
Fax 409 70 46

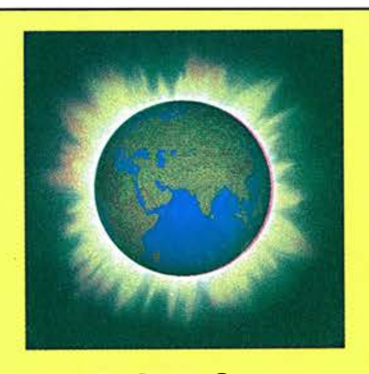


ISSN 0210136X Dep. legal: B. 38.999 - 76

Fotocomposición: Tecfa. Línea Fotocomposición, S.A. Almogàvers, 189 - 08018 Barcelona
Fotocromos reproducidos por Scan V2, S.A., Pje. Jansana, 8 Bajos - 08902 l'Hospitalet (Barcelona)
Imprime Rotographik, S.A. Ctra. de Caldes, km 3,7 - Santa Perpètua de Mogoda (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España

Los espacios en gris
corresponden a publicidad
en la edición impresa



ENERGIA PARA LA TIERRA

Número extraordinario de

INVESTIGACION Y CIENCIA

Noviembre de 1990

Hace...

... cincuenta años

SCIENTIFIC AMERICAN: «Un nuevo avión, con doble personalidad (caza y bombardero), ha permitido a los británicos desarrollar una técnica de ataque enteramente nueva, más allá de las propias innovaciones de la guerra aérea moderna. En una época en que los aparatos se equipan ya con motores sobrealimentados para que puedan surcar los aires de la subestratosfera, este último modelo de avión de combate se ciñe al terreno e incluso baja en picado por hondonadas y barrancos para ocultarse al fuego enemigo. La técnica ha planteado problemas de balística inéditos. Cuando una bomba choca con el suelo cayendo desde una altura tan reducida, rebota horizontalmente y da en el blanco de costado y no por encima. Esto resulta apropiado para blancos de gran tamaño. Pero un piloto que observó el ataque de un compañero sobre una estación ferroviaria informa que las bombas atravesaron limpiamente las dos paredes y fueron a estallar inocuamente a unos 250 metros de distancia.»

«Recientemente, los ingenieros del laboratorio de alta tensión de Westinghouse produjeron relámpagos artificiales que descargaron sobre un cubo de arena con el propósito de reproducir las fulguritas vítreas que se forman por acción de los rayos naturales de las tormentas. 'Como para fundir la arena para que cristalice en fulguritas hace falta una temperatura del orden de más de 1600 grados, los experimentos nos aportan un conocimiento muy claro acerca del tremendo calor que pueden generar los rayos', declara el doctor P. L. Bellaschi, director del grupo. 'Las fulguritas podríamos llamarlas rayos petrificados, puesto que presentan la misma forma arborescente y sinuosa que los rayos que las crean. Los ejemplares naturales se encuentran a veces enterrados en el suelo, especialmente en las arenas secas de los desiertos. Se trata de los denominados tubos de rayo, vítreos, formados con sílice cristalizada por acción de un rayo que haya hendido la arena seca a la busca de tierra húmeda donde neutralizar su carga.'»

«Entre las muchas explicaciones que pueden darse a los colectores de radiación solar, quizá la más sencilla sea la calefacción de casas en climas fríos, aunque soleados. El sistema se compondría de un depósito perfectamente aislado desde el que se bombearía agua hacia el colector; de éste retornaría el agua una vez que se hallara más caliente que la del depósito, pero atravesando una red de radiadores para caldear el edificio. Para investigar en este campo, en terrenos del Instituto de Tecnología de Massachusetts se ha construido un chalet experimental. Durante muchos meses el proyecto ha estado sometido a ensayos prácticos y se están consiguiendo datos valiosos acerca del número óptimo de placas de vidrio, la mayor inclinación de éstas, la relación entre las superficies del tejado y el depósito y la conveniencia de emplear vidrios especiales.»

... cien años

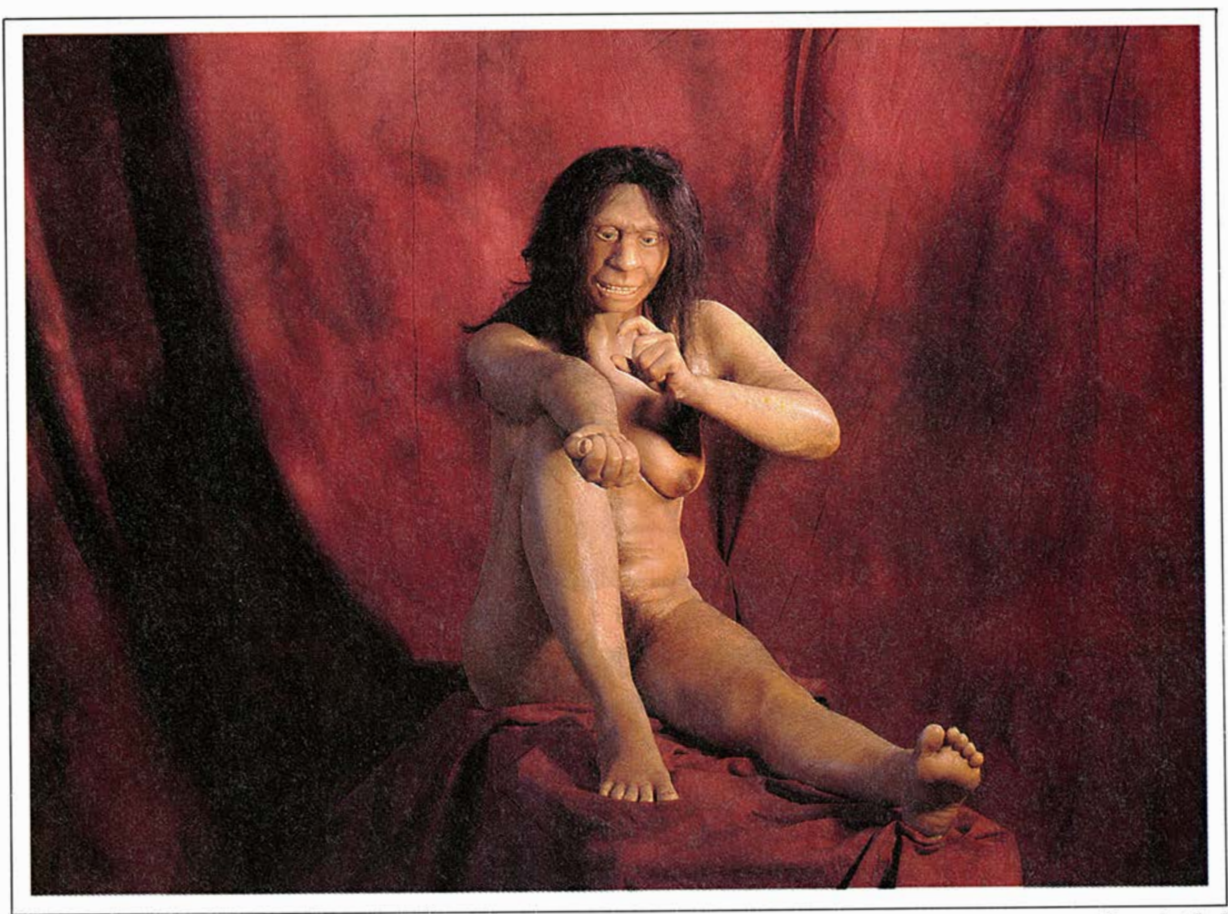
SCIENTIFIC AMERICAN: «La pitón mayor que encontramos durante nuestra estancia en Filipinas medía 6,90 metros de longitud y 56 centímetros de ancho en su parte más gruesa. Una serpiente de ese tamaño podría derribar a un búfalo mediano, estrujar a un hombre hasta matarlo en una fracción de minuto y no dudamos en manifestar nuestra opinión de que podría tragárselo. Sabemos del caso de una serpiente de esas dimensiones que se tragó un ciervo adulto con su cornamenta, cuyo perímetro de cintura es mayor que el de un hombre en torno a los hombros.»

«Despacho procedente de San Petersburgo: El que se cree que es el mayor aerolito caído hasta la fecha yace en el mar Caspio, a poca distancia de la península de Abcheron. El aerolito producía un ruido terrible mientras surcaba raudo la atmósfera y su masa candente iluminaba la tierra y el mar en muchas leguas a la redonda. Al chocar contra el agua levantó nubes ingentes de vapor. Enormes masas de agua fueron proyectadas hacia arriba, brindando una visión bellísima que pudieron disfrutar todos aquellos que no eran presas del miedo.»

Origen del hombre moderno

Hace millón y medio de años, hombres primitivos que hoy llamamos Homo erectus *salieron de Africa hacia un mundo deshabitado. ¿Fueron sus descendientes —los Neandertal de Europa, el Hombre de Pekín en China, el Pitecántropo de Java y otros— nuestros antecesores? ¿Fueron, por contra, primos lejanos de ramas extinguidas en el árbol de familia humano? Estas cuestiones dividen hoy a los paleoantropólogos.*

En la mesa de debate de la revista hay dos bandos: el registro fósil tradicional y el tesoro de información recién hallado, el de la extrapolación a la historia evolutiva de organismos vivos que los biólogos moleculares hacen de los cambios operados en los genes. Las conclusiones que se extraen no son compartidas. En estas páginas, dos genéticos, Allan C. Wilson y Rebecca L. Cann, sugieren que los hombres modernos descienden de humanos que vivieron en Africa hace sólo 200.000 años y sustituyeron a los hombres primitivos en otras partes. Alan G. Thorne y Milford H. Wolpoff, antropólogos, alegan en cambio que el Homo sapiens *moderno surgió gradualmente en todo el mundo. Los puntos de vista que uno y otro bando aportan revelan la potencia —y las limitaciones— de los instrumentos disponibles para indagar en la prehistoria.*



Neanderthal



Homo erectus



Homo erectus

Neanderthal

1. RECONSTRUCCION DE HOMBRES Y MUJERES PREHISTORICOS para la nueva Sala de Biología Humana y Evolución que el Museo Americano de Historia Natural abrirá en 1993. Sus cabezas se basan en cráneos fósiles. Los cuerpos son modificaciones de réplicas de individuos vivos cuya constitución física responde en general a la que se cree tenían los hombres primitivos.

Origen africano reciente de los humanos

La genética nos revela que una mujer africana, de hace 200.000 años, fue nuestro antepasado común

Allan C. Wilson y Rebecca L. Cann

En la búsqueda de hechos relativos a la evolución humana, los genéticos moleculares nos hemos empeñado, por segunda vez, en un debate con los paleontólogos. Tiempo atrás, creían éstos que la división entre los humanos y los antropomorfos ocurrió hace 25 millones de años; nosotros manteníamos que los genes de humanos y antropomorfos eran demasiado parecidos para que el cisma se remontara más allá de algunos, pocos, millones de años. Tras 15 años de porfía, ganamos la partida, al admitir los paleontólogos que la razón estaba de parte nuestra.

De nuevo andamos a la greña; ahora, a propósito de la última fase de la evolución humana. Afirman los paleontólogos que los humanos modernos evolucionaron, desde sus predecesores arcaicos dispersos por todo el mundo, durante el último millón de años. A ello contraponemos las comparaciones genéticas, que nos dan pie para sostener que todos los humanos vivientes pueden remontarse por líneas genealógicas maternas de descendencia hasta una mujer que vivió hace unos 200.000 años, probablemente en Africa. Los humanos modernos surgieron en un lugar y de ahí se extendieron a otros.

Ni la información genética de los vivos, por sí sola, ni los restos fósiles de los muertos, de manera exclusiva, pueden explicar cómo, cuándo y dónde se originaron las poblaciones. Pero la primera goza de ventaja decisiva al poder determinar la estructura de los árboles genealógicos: los genes vivos deben tener antecesores, mientras que los muertos fósiles pueden no tener descendientes. Los biólogos moleculares saben que los genes objeto de su estudio tuvieron que pasar a través de linajes que sobrevivieron hasta hoy; los paleontólogos no pueden estar seguros de que los fósiles que examinan no conducen a una calle cortada.

El método molecular está exento de otras limitaciones de la paleontología. No necesita fósiles bien datados o utensilios de cada parte del árbol familiar que espera describir. No está viciado por dudas sobre si los utensilios hallados cerca de los fósiles fueron hechos y usados por la población que éstos representan. Finalmente, se ocupa de una serie de características que es completa y objetiva.

Del genoma, o serie total de genes, decimos que está completo porque contiene toda la información biológica heredada por un individuo. Más aún, todas las variantes del genoma que aparecen en el seno de una población —grupo de individuos interfecundos— pueden igualmente estudiarse, de forma que las peculiaridades específicas no tienen por qué distorsionar la interpretación de los datos. Los genomas son fuentes objetivas de datos porque ofrecen pruebas no calificadas, a fin de cuentas, por ningún modelo evolutivo. Las secuencias génicas, empíricamente verificables, no se moldean con prejuicios teóricos.

El registro fósil, por otra parte, es bellacamente inconsistente, pues un montón de huesos conservados podría no representar a la mayoría de organismos que no dejaron vestigio. Los fósiles no admiten, por principio, una interpretación objetiva; los caracteres físicos por los que son clasificados reflejan necesariamente los modelos que los paleontólogos quieren probar. Si se clasifica, por ejemplo, una pelvis como humana porque soportó una postura erguida, se está presuponiendo que la bipedestación distinguió a los primeros homínidos de los antropomorfos. Tal discurso tiende a la circularidad. La perspectiva del paleontólogo porta un sesgo estructural que limita su poder de observación.

Los biólogos expertos en teoría de la evolución han de rechazar la idea de que los fósiles proporcionan la prueba más directa del proceder real de la evolución humana. Los fósiles ayudan a rellenar el conocimiento de cómo operaron en el pasado los procesos biológicos, pero no deben cegarnos ante nuevas líneas de prueba ni ante nuevas interpretaciones de materiales arqueológicos mal entendidos y fechados de manera provisional.

Todas las ventajas de nuestra disciplina quedaron patentes en 1967, cuando Vincent M. Sarich, trabajando en el laboratorio de Wilson en la Universidad de California en Berkeley, se enfrentó a *Ramapithecus*, un primate fósil. Los paleontólogos habían datado sus restos en unos 25 millones de años. Sobre la base del espesor del esmalte dental y otros caracteres del esqueleto creían que el ramapiteco había aparecido después de la divergencia de los linajes humano y antropomorfo y que era directo antecesor de los humanos.

Sarich midió la distancia evolutiva entre humanos y chimpancés estudiando sus seroproteínas. Sabía que las diferencias entre éstas reflejan mutaciones acumuladas desde su separación. (En aquel tiempo, era más fácil comparar sutiles diferencias de proteínas que cotejar las secuencias genéticas que codifican las proteínas.) Para comprobar que las mutaciones habían ocurrido con idéntica cadencia en ambos linajes, comparó chimpancés y humanos con una especie de referencia y encontró que todas las distancias genéticas encajaban.

Sarich disponía ya de un reloj molecular; el paso siguiente era calibrarlo. Para lo cual, calculó el índice de mutación en otras especies cuyas divergencias podían datarse con verosimilitud por fósiles. Luego aplicó el reloj a la separación entre chimpancés y humanos, datándola entre hace cinco y siete millones de años

ALLAN C. WILSON y REBECCA L. CANN han aplicado técnicas genéticas a la paleontología en muchas de sus colaboraciones. Hasta su muerte en 1991, Wilson fue profesor de bioquímica en la Universidad de California en Berkeley. Nacido en Nueva Zelanda, inició su formación en la Universidad de Otago en 1955, que prosiguió en la estatal de Washington hasta recibir el doctorado por Berkeley. Trabajó en el Instituto Weizmann de la Ciencia, la Universidad de Nairobi y la de Harvard. Cann da clases de genética y biología molecular en la facultad de medicina John A. Burns adscrita a la Universidad de Hawai en Manoa. Se doctoró en antropología por Berkeley, donde trabajó luego como becaria de Wilson. Una de sus líneas de investigación actuales está centrada en la aplicación del ADN mitocondrial a la determinación de la diversidad genética en aves de las islas Hawai.

—mucho más tarde de lo que nadie imaginara.

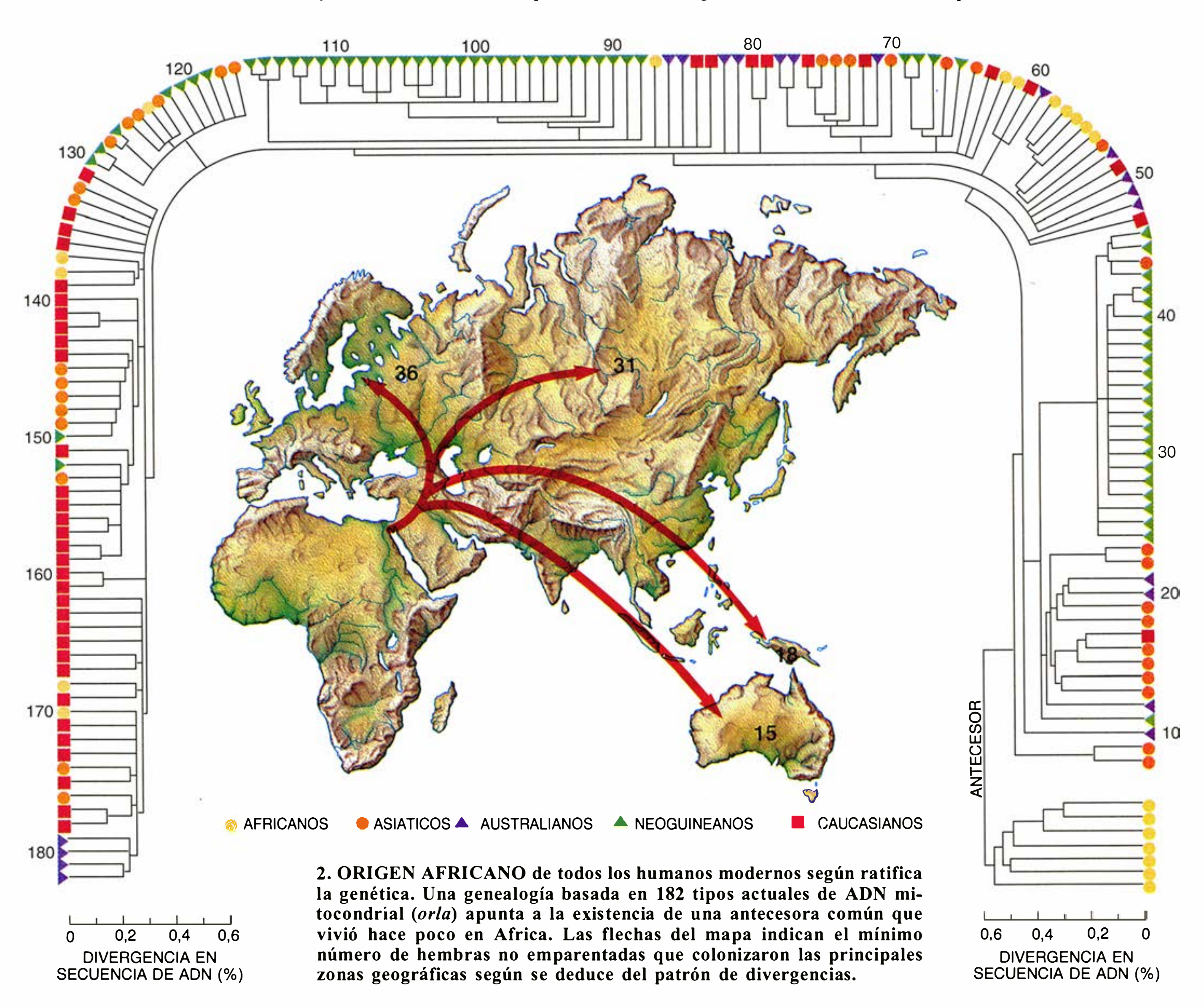
Al principio, la mayoría de los paleontólogos se aferraban al dato mucho más antiguo. Pero nuevos hallazgos fósiles minaban el status humano de *Ramapithecus*; hoy está claro que *Ramapithecus* es igual que *Sivapithecus*, un antecesor de los orangutanes, no de antropomorfo africano alguno. Más aún, la edad de algunos sivapitecos se rebajó hasta sólo unos seis millones de años. A comienzos de la década de los ochenta, casi todos los paleontólogos acabaron aceptando el dato más reciente de Sarich para la separación de las líneas humana y de antropomorfos. A los que seguían rechazando sus métodos no les quedó otro asidero que el de aducir que el biólogo molecular había dado con la solución correcta por pura suerte.

De las primeras comparaciones entre proteínas de especies diferentes brotaron dos nuevas ideas: la de las mutaciones neutras y la del reloj molecular. Con respecto a la primera, la evolución molecular parece dominada por esas mutaciones fútiles que se acumulan con una cadencia sorprendentemente regular en los linajes supervivientes. Dicho de otro modo, la evolución génica es, sobre todo, resultado de la acumulación inflexible de mutaciones que no parecen ser dañinas ni beneficiosas. La segunda idea, la de los relojes moleculares, surgió de la observación de que el ritmo de cambio genético según mutaciones puntuales (cambios en determinados pares de bases de ADN) era tan regular, en largos períodos, que se las podía usar para datar divergencias de troncos comunes.

Pudimos aplicar estos métodos a la reconstrucción de las últimas etapas de la evolución humana después de 1980, cuando el análisis de restricción del ADN permitió explorar las diferencias genéticas con alta resolución. En Berkeley, Wes Brown, Mark Stoneking y los autores recurrimos a ese medio para rastrear las genealogías maternas de muestras de personas en todo el mundo.

El ADN que estudiamos reside en las mitocondrias, orgánulos celulares que convierten alimentos en energía disponible para el resto de la célula. A diferencia del ADN nuclear, que forma haces de largas fibras, constituida cada una por una doble hélice revestida de proteínas, el ADN mitocondrial se presenta en pequeños anillos de doble filamento. Mientras el ADN nuclear codifica unos 100.000 genes —casi toda la información necesaria para formar un ser humano—, el ADN mitocondrial sólo codifica 37. En este puñado de genes, cada uno es imprescindible: sabemos que una sola mutación adversa en uno de ellos causa graves enfermedades nerviosas.

El ADN mitocondrial tiene una doble ventaja sobre el ADN del núcleo, para los científicos que investigan el momento de separación de los linajes. Primera, las secuencias de ADN mitocondrial que nos interesan



2. ORIGEN AFRICANO de todos los humanos modernos según ratifica la genética. Una genealogía basada en 182 tipos actuales de ADN mitocondrial (*orla*) apunta a la existencia de una antecesora común que vivió hace poco en Africa. Las flechas del mapa indican el mínimo número de hembras no emparentadas que colonizaron las principales zonas geográficas según se deduce del patrón de divergencias.

acumulan mutaciones rápida y constantemente, según observaciones empíricas. Por tratarse de mutaciones que, en muchos casos, no alteran la función de la mitocondria, son de hecho neutras, y la selección natural no las elimina.

Este ADN mitocondrial se comporta, pues, como un reloj de rápido tic-tac, lo que es fundamental para identificar cambios genéticos recientes. Cualquier par de humanos escogidos al azar de cualquier punto del planeta se parecen tanto en casi todas sus secuencias de ADN, que podemos medir la evolución de nuestra especie concentrándonos sólo en los genes que mutan más deprisa. Los genes que controlan los rasgos esqueléticos no pertenecen a este grupo.

Segunda ventaja: a diferencia del ADN nuclear, el de la mitocondria se hereda sólo de la madre, sin más cambio que las eventuales mutaciones. La contribución paterna acaba en la papelera, como quien dice, de los recortes. Los genes nucleares, a los que el padre contribuye, se propagan en lo que podemos llamar linajes corrientes, que son por supuesto importantes para la transmisión de rasgos físicos. Para nuestros estudios sobre origen de los humanos modernos, sin embargo, nos fijamos en los linajes mitocondriales y maternos.

Los linajes maternos son los más idénticos entre hermanos, porque su ADN mitocondrial sólo ha tenido una generación para incorporar mutaciones. El grado de proximidad decrece paso a paso, según se avanza en la genealogía, desde los primos hermanos que descienden de la misma abuela materna hasta los primos segundos que descienden de la misma bisabuela materna, y así sucesivamente. Según nos remontamos en la genealogía, mayor se hace el círculo de parientes maternos, hasta incluir a todos los vivientes.

De ello se infiere, en pura lógica, que todo el ADN mitocondrial humano debe haber tenido una última antecesora común. Pero es fácil mostrar que ésta no vivió necesariamente en una pequeña población, ni fue la única mujer de su generación. Imaginemos una población estática que siempre mantiene 15 madres. Cada nueva generación tendrá 15 hijas, pero algunas madres no tendrán hija, mientras que otras tendrán dos o más. Como las líneas maternas se extinguen siempre que no haya hija para continuarlas, es sólo cuestión de tiempo la desaparición de todos los linajes menos uno. En una población estable el tiempo para esta reducción a un linaje materno es la duración de una generación multiplicada por el doble del tamaño de la población.

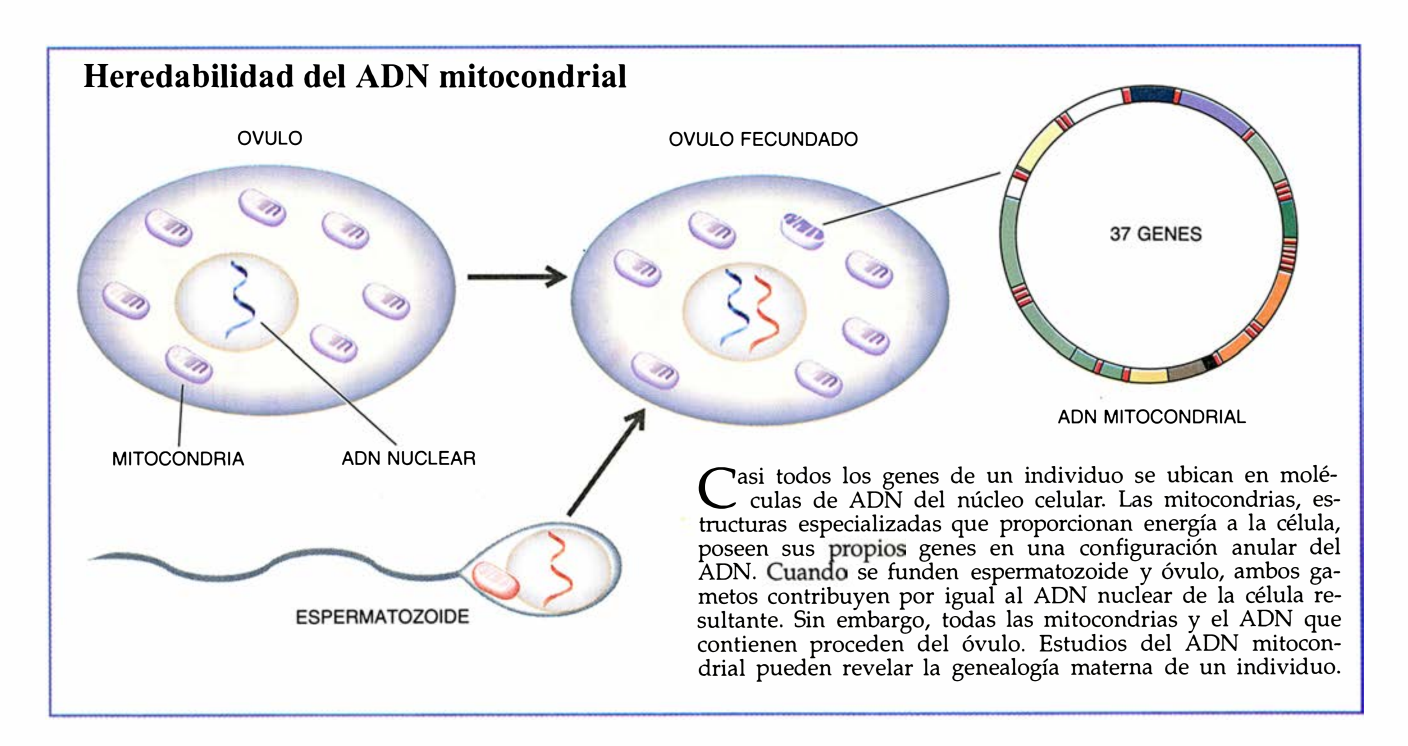
Podemos llamar "Eva" a la feliz mujer cuyo linaje permanece. Téngase en cuenta, no obstante, que en tiempos de esa Eva vivían otras mujeres y que Eva no tenía un puesto de favor en el tablero de crianza. Es puramente beneficiaria de la suerte. Más aún, si fuéramos a reconstruir los linajes de la población, nos retrotraerían a muchos de los hombres y mujeres contemporáneos de Eva. Los genéticos de poblaciones Daniel I. Hartl, de la facultad de medicina de la Universidad de Washington, y Andrew G. Clark, de la Universidad estatal de Pennsylvania, estiman que podían vivir entonces hasta 10.000 personas. Por tanto, el nombre de Eva puede despistar —no es la fuente última de todos los linajes ordinarios, como fue la Eva bíblica.

Con los datos del ADN mitocondrial podemos definir los linajes maternos de personas vivas remontándonos hasta un antecesor común. En teoría, un gran número de árboles genealógicos distintos pudo dar origen a cualquier serie de datos genéticos. Para reconocer al más probablemente correcto, se puede aplicar el principio de parsimonia, que exige que los individuos estén relacionados del modo más sencillo posible. El árbol hipotéticamente más eficaz debe contrastarse comparándolo con otros datos para ver si es coherente con ellos. Si el árbol se mantiene, se le analiza como prueba de la historia geográfica ínsita en sus elementos.

En 1988 Thomas D. Kocher, entonces en Berkeley y hoy en la Universidad de New Hampshire, aplicó una interpretación parsimoniosa así a la interrelación del ADN mitocondrial de 14 individuos de todo el mundo. Determinó que 13 nudos de ramificación eran el mínimo que podían reconocerse para las diferencias que encontró. Teniendo en cuenta las consideraciones geográficas, concluyó que Africa era la patria humana más remota: la distribución global de los tipos de ADN mitocondrial que vio podían explicarse, pues, del modo más simple con no más de tres hechos migratorios a otros continentes.

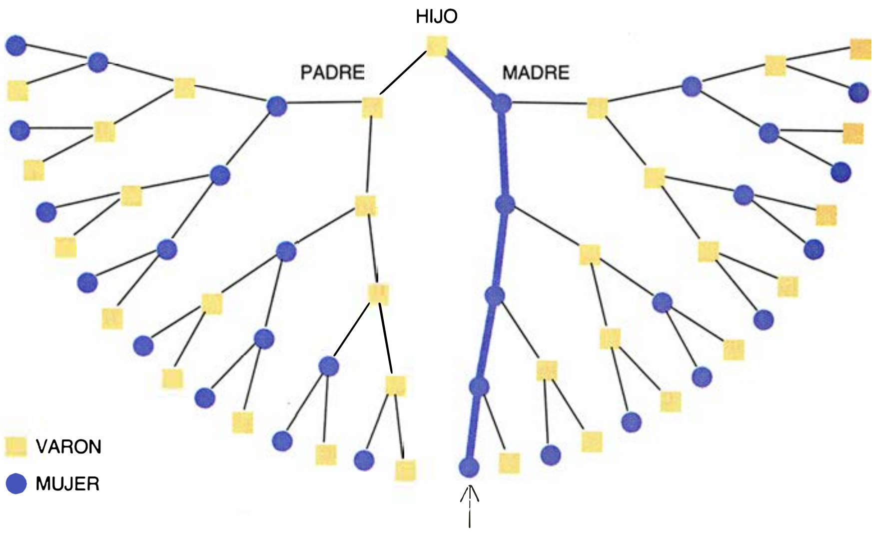
Un supuesto crucial en este análi-

Heredabilidad del ADN mitocondrial



Casi todos los genes de un individuo se ubican en moléculas de ADN del núcleo celular. Las mitocondrias, estructuras especializadas que proporcionan energía a la célula, poseen sus propios genes en una configuración anular del ADN. Cuando se funden espermatozoide y óvulo, ambos gametos contribuyen por igual al ADN nuclear de la célula resultante. Sin embargo, todas las mitocondrias y el ADN que contienen proceden del óvulo. Estudios del ADN mitocondrial pueden revelar la genealogía materna de un individuo.

sis es que todos los linajes mitocondriales evolucionan con la misma velocidad. Por esta razón, cuando Kocher realizó su comparación de ADN mitocondriales humanos, incluyó también secuencias análogas de cuatro chimpancés. Si las líneas humanas hubieran diferido en la velocidad con que sumaron mutaciones, entonces unas de las 14 secuencias humanas hubieran estado más cerca o más lejos de las secuencias de los chimpancés que otras. De hecho, las 14 secuencias humanas son todas casi equidistantes de las secuencias de los chimpancés, lo que implica una clara uniformidad en la velocidad de cambio de las humanas.



3. LA GENEALOGIA de un individuo ilustra la diferencia entre los patrones de herencia nuclear y mitocondrial: 32 antecesores de cinco generaciones contribuyeron por igual a su ADN nuclear. Su linaje mitocondrial (*línea azul*) reconduce a una sola persona en cada generación.

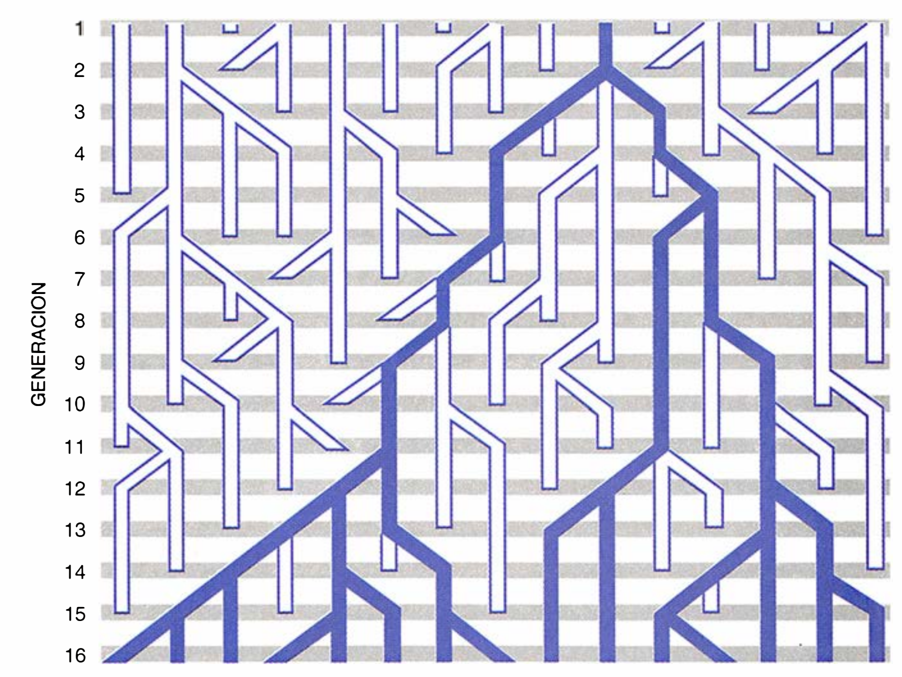
Los datos de los chimpancés ilustraron también la notable homogeneidad genética entre humanos: la variabilidad genética de los chimpancés decuplica la observada en humanos. Dato que, por sí solo, sugiere que toda la humanidad moderna brotó de un lote bastante restringido de antepasados comunes.

Trabajando en Berkeley con Stoneking, generalizamos la investigación de Kocher con el examen de un árbol genealógico más amplio: 182 tipos distintos de ADN mitocondrial de 241 individuos. Las presencias múltiples de tipos de ADN mitocondrial concurrían siempre entre gente de un mismo continente y normalmente en personas que vivían dentro de un radio de unos 150 kilómetros. El árbol que construimos constaba de dos ramas principales y ambas reconducían a Africa, lo que respaldaba la hipótesis del origen africano de los humanos modernos.

De nuestro estudio se desprende que, si bien las barreras geográficas influyen en el ADN mitocondrial de una población, los habitantes del continente que consideremos no pertenecen todos, por lo común, a una misma línea materna. Los neoguineanos constituyen un ejemplo arquetípico. Sospechábase su diversidad genética a raíz de los análisis filológicos de sus familias lingüísticas —muy diversas, aunque clasificadas comúnmente como papú— habladas en esta sola isla. En nuestro árbol genealógico, los neoguineanos mostraron varias ramas diferentes, señal de que la antepasada común de todos los neoguineanos no era de Nueva Guinea. La población de Nueva Guinea debió de fundarse por muchas madres cuyas líneas maternas guardaban estrecho parentesco con las de Asia.

Este descubrimiento es lo que cabía esperar si la hipótesis del origen africano fuese cierta; al salir de Africa hacia el Este, la gente tenía que cruzar Asia. El viaje era probablemente lento, y, durante el tiempo que costó llegar a Nueva Guinea, se añadieron mutaciones tanto en los linajes que quedaron en Asia como en los que fueron más lejos.

Así pues, pobladores que se manifiestan emparentados en una misma raza geográfica no tienen por qué guardar un estrecho parentesco en su ADN mitocondrial. En razón de las mitocondrias, no podemos abordar las razas como si fueran especies biológicas. Las características anatómicas que unen a los neoguineanos no se recibieron, por herencia, de los primeros ocupantes; antes bien, creemos que se desarrollaron tras nuevas colonizaciones, máxime como resultado de mutaciones en los genes nucleares, extendidas mediante el sexo y la recombinación por toda Nueva Guinea. Abundando en la misma idea, el color claro de la piel de muchos blancos es probablemente un desarrollo tardío en Europa, posterior a la colonización de este continente por africanos.



4. MADRE ANTECESORA UNIVERSAL que podemos hallar para todos los miembros de cualquier población. El ejemplo remonta los linajes de 15 hembras en una población estable. En cada generación, proliferan unos linajes maternos y otros se extinguen. Con el tiempo, un linaje materno acaba sustituyendo a todos los demás.

Durante los primeros años de la década de los ochenta, cuando construíamos nuestro árbol genealógico, nos apoyábamos en negros americanos, a falta de africanos, cuyo ADN mitocondrial era difícil de obtener en la cantidad necesaria. Para nuestra ventura, la invención reciente de la reacción en cadena de la polimerasa ha vencido ese freno. La técnica posibilita duplicar secuencias de ADN fácilmente, hasta el infinito; una muestra inicial pequeña de ADN puede multiplicarse en una provisión inagotable.

La reacción en cadena de la polimerasa permitió a Linda Vigilant, hoy en la Universidad estatal de Pennsylvania, rehacer nuestro estudio usando datos de ADN mitocondrial de 120 africanos que representaban seis partes distintas de la región subsahariana. Vigilant trazó un árbol genealógico cuyas 14 ramas más profundas conducen exclusivamente hasta Africa: la decimoquinta rama lleva a africanos y no africanos. Los no-africanos se hallan en ramas secundarias superficiales que brotan de la rama 15. Considerando el número de ADN mitocondriales africanos y no-africanos estudiados, la probabilidad de que las 14 ramas más remotas no fueran exclusivamente africanas es de 1 contra 10.000 para un árbol con este orden de ramificación.

Satoshi Horai y Kenji Hayasaka, del Instituto Nacional de Genética de Japón, estudiaron de modo análogo muestras que incluían muchos más asiáticos e individuos de menos partes de Africa: los linajes mitocondriales reconducían, de nuevo, a Africa. La probabilidad, por nosotros calculada, de que llegaran accidentalmente a esta conclusión era sólo de 4 contra 100. Aunque estas evaluaciones estadísticas no son pruebas incontrovertibles ni definitivas, confieren verosimilitud a la teoría del origen africano para el ADN mitocondrial humano.

Como nuestras comparaciones con los datos de chimpancés demostraban que el reloj de ADN mitocondrial humano poseyó un tic-tac constante durante millones de años, sabíamos que era posible calcular cuándo vivió la madre común de la humanidad. Partimos del supuesto de que los linajes humano y del chimpancé se separaron hace cinco millones de años, como demostrara el trabajo de Sarich. Después calculamos cuánto se habían separado los humanos entre sí con relación a su distanciamiento de los chimpancés; esto es, encontramos el índice entre la divergencia del ADN mitocondrial humano y la que separa a humanos y chimpancés.

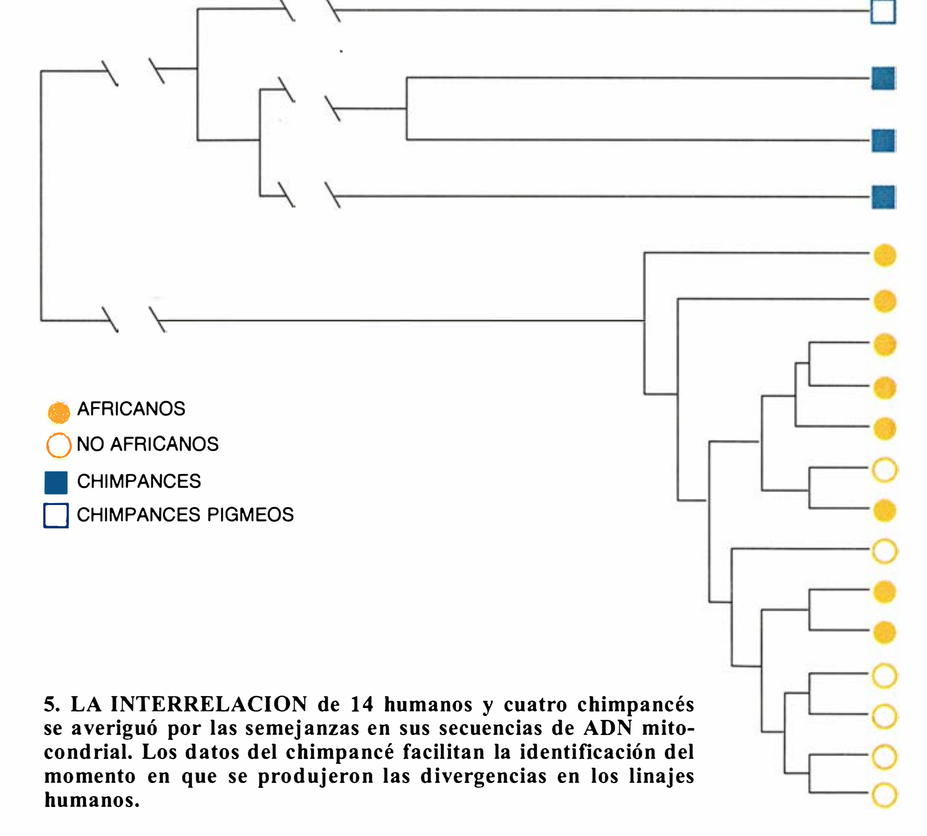
Usando dos series diferentes de datos, resolvimos que el índice era inferior a 1/25. Por tanto, los linajes maternos humanos crecieron aparte en un período de menos de $^{1}/_{25}$ava parte de cinco millones, o sea, menos de 200.000. Con una tercera serie de datos sobre cambios en una sección del ADN mitocondrial llamada la región de control, obteníamos una fecha más antigua para la madre común, fecha que, sin embargo, resulta menos segura, porque persisten dudas sobre la corrección necesaria ante la avalancha de mutaciones que presenta la región de control.

Cabe objetar que un reloj molecular que se sabe exacto para cinco millones de años puede no ser fiable en períodos más cortos. Es concebible, por ejemplo, que haya intervalos de estancamiento genético, interrumpidos por cortos estallidos de cambio, cuando acaso un nuevo mutágeno entre en el ambiente, un virus infecte células de la línea germinal o un intensa selección natural afecte todos los segmentos de ADN. Para excluir la posibilidad de que el reloj funcione con pausas y arranques, medimos cuánto ADN mitocondrial ha evolucionado en poblaciones fundadas en un tiempo conocido.

Se estima que las poblaciones aborígenes de Nueva Guinea y Australia se fundaron hace menos de 50.000 o 60.000 años. La cantidad de evolución operada desde entonces, en cada uno de esos lugares, parece cifrarse en un tercio del total de la especie humana. De esto podemos deducir que Eva vivió hace el triple de 50.000 o 60.000 años, o sea, hace unos 150.000 a 180.000 años. Todos nuestros cálculos coinciden así en que la dispersión ocurrió hace cerca de 200.000 años.

Cálculos que encajan con una línea de prueba fósil, por lo menos. Los restos humanos de anatomía moderna aparecen primero en Africa, luego en el Próximo Oriente y más tarde en Europa y Asia oriental. Los antropólogos suponen que, en Africa oriental, la transición de humanos anatómicamente arcaicos a modernos ocurrió hace no más de 130.000 años.

Por contra, una segunda línea de prueba no se acomoda a ese modo de ver las cosas. El registro fósil muestra claramente que las partes meridionales de Eurasia se ocuparon por humanos arcaicos que emigraran de Africa a Asia hace cerca de un millón de años. Fósiles tan célebres como el Hombre de Java y el Hombre de Pekín son de esa clase. Este descubrimiento y la hipótesis de que la población eurasiática arcaica sufrió cambios anatómicos que los hizo más parecidos a los humanos modernos condujeron al modelo de evolución multirregional: cambios evolutivos semejantes en diversas regiones geográficas convirtieron a los habi-

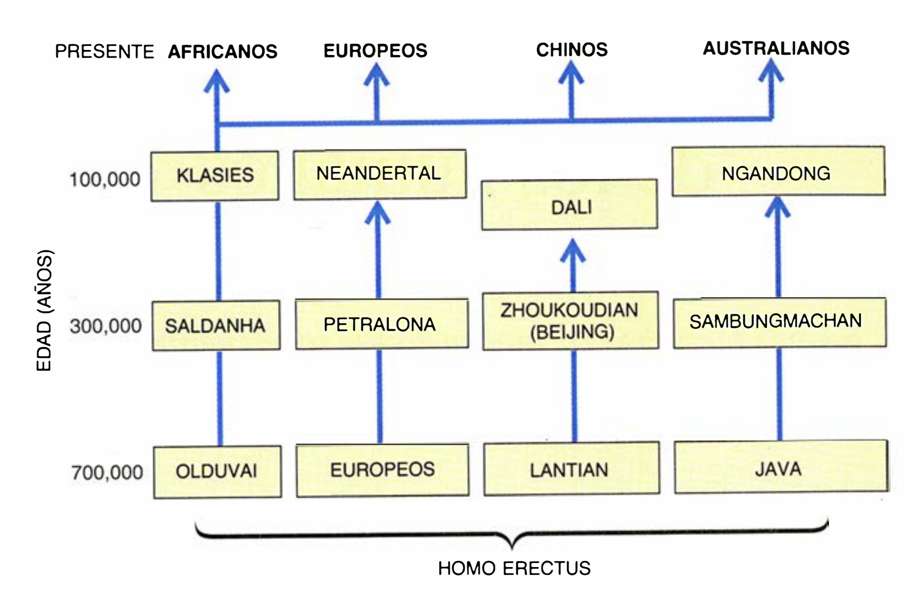


5. LA INTERRELACION de 14 humanos y cuatro chimpancés se averiguó por las semejanzas en sus secuencias de ADN mitocondrial. Los datos del chimpancé facilitan la identificación del momento en que se produjeron las divergencias en los linajes humanos.

tantes arcaicos microencefálicos en tipos modernos macroencefálicos.

Con todo, se hubieran necesitado altos niveles de flujo génico para mantener a las poblaciones humanas como una sola especie biológica. El modelo de evolución multirregional también predice que al menos algunos genes de la moderna población esteasiática se hallarían más ligados a los de sus predecesores asiáticos arcaicos que a los de los africanos modernos. Podríamos esperar encontrar linajes remotos en Eurasia, sobre todo en Extremo Oriente. En cambio, las prospecciones en nuestros laboratorios y en otros, con más de 1000 personas de Eurasia y sus satélites mitocondriales (Australia, Oceanía y las Américas), no han dado indicios de tal resultado.

Parece, pues, muy improbable que algún linaje verdaderamente antiguo haya sobrevivido oculto en Eurasia. Sencillamente, no vemos el resultado que predice el modelo regional. Más aún, los genéticos Masatoshi Nei, de Pensylvania, Kenneth K. Kidd, de Yale, James Wainscoat, de Oxford, y Luigi L. Cavalli-Sforza, de Stanford, encuentran apoyo al modelo de origen africano en sus estudios de genes nucleares.



6. SUSTITUCION GENERAL DE LOS GRUPOS HUMANOS por humanos modernos de Africa. Las hembras arcaicas no parecen haber aportado sus genes mitocondriales a las razas modernas de Europa, Asia oriental y Australia.

Los defensores del modelo multiregional de evolución ponderan que han documentado la continuidad de morfologías anatómicas entre residentes arcaicos y modernos de diversas regiones; insisten en la improbabilidad de que esas morfologías se desarrollaran independientemente en un pueblo invasor. Para que este argumento valga, debe mostrarse que los rasgos craneales en cuestión son en verdad independientes entre sí; esto es, que la selección natural no tiende a favorecer ciertas constelaciones de formas funcionalmente relacionadas. Pero sabemos que unos potentes músculos masticadores pueden imponer cambios en la mandíbula, el toro supraorbitario y otros puntos craneales; las circunstancias que favorecieron la evolución de estas formas en una población pueden hacerlo de nuevo en otra población emparentada.

Otros paleontólogos ponen en tela de juicio la existencia de tal continuidad. Arguyen que las poblaciones modernas no están ligadas a las antiguas por características morfológicas que se desarrollaran sólo en el registro fósil. Por contra, poblaciones fósiles y modernas están unidas por la retención común de rasgos ancestrales más antiguos. La continuidad que ven los creyentes en la evolución multiregional podría ser mera ilusión.

La idea de que los humanos modernos cohabitaran en una región con arcaicos y acabaran sustituyéndolos por completo sin mezcla alguna puede parecer improbable. Sin embargo, hay datos fósiles que respaldan la hipótesis. Los descubrimientos en las cuevas de Qafzeh en Israel sugieren que los Neandertales y los humanos modernos vivieron codo con codo durante 40.000 años, sin dejar apenas traza de mestizaje.

El modo en que una población humana reemplazó a los humanos arcaicos sin mezcla genética detectable continúa envuelto en el misterio. Uno de nosotros (Cann) sospecha que las enfermedades infecciosas contribuyeron al proceso, promoviendo la eliminación de un grupo. Cavalli-Sforza especula con el desarrollo en los antepasados de los humanos modernos de algún rasgo moderno, como la capacidad de lenguaje avanzado, que les impidió eficazmente cruzarse con otros homínidos. Estas cuestiones y otras ligadas cederán cuando los biólogos moleculares aprendan a ligar secuencias genéticas específicas con rasgos físicos y de conducta.

E incluso antes, la investigación en el ADN nuclear y mitocondrial habrá de rendir árboles genéticos portadores de mayor información. Especialmente seductivas son las secuencias del cromosoma Y, que determina la masculinidad y que, por tanto, se hereda sólo del padre. El laboratorio de Gerard Lucotte, en el Collège de France, ha comparado indirectamente tales secuencias en un esfuerzo por retrazar linajes paternos hasta un único progenitor —"Adán", si se quiere. Estos resultados preliminares también apuntan a una patria africana; con ulterior refinamiento, este trabajo sobre linajes paternos podría ofrecer quizás un valioso contraste para nuestros resultados sobre linajes maternos. Por desgracia, los cambios de bases se acumulan despacio en las regiones útiles del cromosoma Y, lo que hace difícil llevar un análisis genealógico detallado.

Mayor progreso cabe aún esperar en el futuro inmediato, a medida que los biólogos moleculares vayan aplicando sus técnicas a materiales descubiertos por nuestros amistosos rivales, los paleontólogos. Se han realizado los primeros estudios sobre ADN de tejidos momificados hallados en un pantano de Florida y datados en hace 7500 años. Métodos avanzados para obtener ADN de huesos fósiles más viejos parecen ya al alcance de la mano. Con ellos, podemos empezar a construir el árbol familiar desde una raíz que viviera en la juventud de la familia humana.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MITOCHONDRIAL DNA. M. Stoneking y A. C. Wilson en *The Colonization of the Pacific: A Genetic Trail*. Dirigido por Adrian V. S. Hill y Susan W. Serjeantson. Oxford University Press, 1989.

MITOCHONDRIAL DNA SEQUENCES IN SINGLE HAIRS FROM A SOUTHERN AFRICAN POPULATION. Linda Vigilant, Renee Pennington, Henry Harpending, Thomas D. Kocher y Allan C. Wilson en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 86, n.º 23, págs. 9350-9354; diciembre de 1989.

SEQUENCE EVOLUTION OF MITOCHONDRIAL DNA IN HUMANS AND CHIMPANZEES. T. D. Kocher y A. C. Wilson en *Evolution of Life*. Dirigido por S. Osawa y T. Honjo. Springer-Verlag, Tokyo; 1991.

Evolución multirregional de los humanos

El registro fósil y la genética proclaman que los grupos humanos surgieron donde se encuentran hoy

Alan G. Thorne y Milford H. Wolpoff

Veinte años atrás, los paleoantropólogos se enzarzaron en una polémica sobre el origen de los primeros humanos. La discrepancia se centraba en si el fósil *Ramapithecus* fue un antecesor humano primitivo o si fue antecesor de las estirpes humana y de antropomorfos. Los biólogos moleculares terciaron en el debate y apoyaron la posición minoritaria mantenida por uno de nosotros (Wolpoff) y sus discípulos, según la cual *Ramapithecus* no era un fósil humano, que era lo que se creía mayoritariamente. Pero su base demostrativa descansaba en una fecha para la divergencia chimpancé-humanos que se fundaba en un "reloj molecular" averiado. Hubimos, pues, de rechazar tal apoyo.

La comunidad de paleoantropólogos torna a verse comprometida en un debate, esta vez sobre cómo, cuándo y dónde se originaron los humanos modernos. De un lado están algunos investigadores que, como nosotros, rechazan la reducción a un solo hogar de la humanidad moderna, para defender que los humanos se originaron en Africa y desarrollaron luego sus formas modernas poco a poco en cada zona del Viejo Mundo. Del otro lado hay autores que proclaman que Africa sola engendró los humanos modernos en los últimos 200.000 años. De nuevo, los genéticos moleculares han entrado en la liza, intentando inclinarla en favor de la hipótesis africana reciente con un reloj molecular. Una vez más, su ayuda debe rehusarse porque su discurso hace agua.

No puede negarse que a la investigación genética se debe una de los grandes principios de la biología del siglo XX: todas las personas somos parientes sumamente próximos. Las semejanzas de nuestros ADN son mucho mayores de lo que pueden sugerir las dispares variaciones anatómicas de la humanidad. Los estudios sobre el ADN que portan las mitocondrias, que heredamos exclusivamente de nuestras madres y es trazador de los linajes maternos, adquieren un papel protagonista en el desarrollo de teorías sobre el origen de las razas humanas modernas.

Pero el ADN mitocondrial no agota las fuentes de información que tenemos sobre el tema. Los restos y artefactos fósiles representan también un cuerpo monumental de testimonios y, lo afirmamos convencidos, mucho más fiable. El interés peculiar de los estudios del ADN mitocondrial reside en que muestran que una de las teorías del origen discutidas por los paleontólogos ha de ser falsa.

Junto con Wu Xinzhi, del Instituto de Paleontología de Vertebrados y Paleoantropología de Beijing, hemos hilvanado el modelo multirregional de evolución humana. Nos llevó a saber que algunas de las formas que distinguen a los principales grupos humanos, como asiáticos, aborígenes australianos y europeos, se desarrollaron durante un largo período, aproximadamente allí donde hoy se encuentran.

La evolución multirregional rastrea todas las poblaciones modernas hasta la salida de los humanos desde Africa, hace por lo menos un millón de años, a través de una trama de linajes antiguos en los que su aportación genética a las poblaciones vivientes varió con la región y con el tiempo. Todavía hoy, distintas poblaciones mantienen sus diferencias físicas, a pesar del mestizaje y migraciones demográficas; esta situación ha existido siempre desde los primeros humanos que colonizaron Europa y Asia. La humanidad moderna se originó dentro de esas poblaciones desplegadas, y la modernización de nuestros antecesores fue un proceso continuado.

La teoría alternativa del "Arca de Noé", elaborada por el paleontólogo William W. Howells, de la Universidad de Harvard, planteaba que la gente moderna surgió recientemente en un solo lugar y que, a continuación, se expandió por el mundo, reemplazando a los demás grupos humanos. Esta sustitución, creen los últimos defensores de la teoría, debe haber sido completa. Según sus análisis genéticos, Allan C. Wilson, desaparecido el año pasado, y sus colegas de la Universidad de California en Berkeley concluyeron que el registro evolutivo del ADN podía rastrearse hasta una única mujer, consagrada como "Eva" en una de sus primeras publicaciones sobre el tema, que vivió en Africa hace aproximadamente 200.000 años. Estos teóricos pretenden que entre la gente actual sólo se encuentra ADN que remonta hasta Eva.

¿De qué modo podría ocurrir tal? Si los descendientes de Eva se hubieran mezclado con otras gentes al expandirse su población, cabría esperar que aún hoy se presentasen otras líneas de ADN mitocondrial, en especial fuera de Africa, donde los descendientes de Eva eran invasores. La explicación más creíble para la actual ausencia de otros linajes de ADN mitocondrial es que ninguna mujer local se juntó con los hombres modernos invasores desde Africa: lo que significa que Eva fundó una nueva especie. La reconstrucción que Wilson hace del pasado exige que, en un período de no más de 150.000 años, hubo una sustitución completa de todos los cazadores-recolectores preexistentes en Africa y el resto

ALAN G. THORNE y MILFORD H. WOLPOFF se han entregado con ahínco al estudio del material fósil original implicado en los orígenes de *Homo sapiens*. Thorne dirige el departamento de prehistoria del Instituto de Estudios Avanzados en la Universidad Nacional de Australia. Se graduó en antropología y zoología por la Universidad de Sidney en 1963 y luego enseñó anatomía humana en su facultad de medicina. Las excavaciones de Thorne en Kow Swamp y el lago Mungo rindieron la mayoría de restos humanos pleistocenos de Australia. Wolpoff enseña antropología en la Universidad de Michigan en Ann Arbor, donde dirige el laboratorio de paleoantropología. Recibió su doctorado en 1969 por la Universidad de Illinois en Urbana-Champaign.

del orbe entonces habitado; después, las formas originales africanas de la especie humana invasora se supone que dieron lugar a los rasgos raciales que vemos en las otras regiones.

Una analogía puede iluminar la diferencia entre nuestra teoría de evolución multirregional y la teoría de la Eva de Wilson. Según el modelo multirregional, el patrón originario de los humanos modernos se parece a un estanque con varios individuos que chapotean en las esquinas del mismo; aunque mantienen su individualidad todo el rato, se influyen mutuamente con los trenes de ondas que levantan (que son el análogo de los genes que fluyen entre poblaciones). Por contra, la exigencia de sustitución total de la teoría de Eva dicta que un nuevo nadador salte a la piscina y salpique de tal modo a los demás nadadores que los ahogue. Una de estas dos visiones de nuestro origen debe ser incorrecta.

El ADN mitocondrial sirve para guiar el desarrollo de las teorías, pero sólo los fósiles aportan bases para refutar una idea o la otra. Como mucho, la información genética explica de qué modo podrían haberse originado los humanos modernos si los supuestos usados en la interpretación de los genes son correctos, pero no podemos apoyarnos en una teoría para probar otra. El registro fósil constituye la prueba real de la evolución humana, y es rico en restos humanos y en yacimientos arqueológicos del último millón de años. A diferencia de los datos de la genética, los fósiles admiten su compulsa con las predicciones teóricas sobre el pasado sin descansar en una larga lista de supuestos.

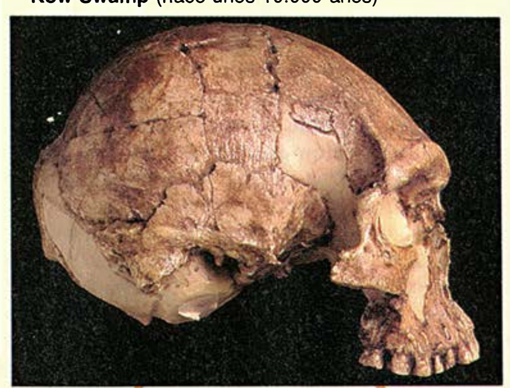
El poder de una teoría se mide por cuánto puede explicar; el método científico exige que intentemos incorporar todas las fuentes de datos en una teoría explicativa. Nuestro objetivo es describir una teoría que sintetice cuanto conocemos sobre los fósiles humanos modernos, los genes y la arqueología. La teoría de Eva no puede.

La teoría de Eva formula cinco predicciones que el registro fósil tendría que corroborar. Premisa primera y principal: los humanos modernos de Africa han de haber sustituido completamente a todos los otros grupos; segunda e implícita en la idea precedente: los primeros humanos modernos aparecieron en Africa; tercera y asimismo derivada: los primeros humanos modernos de otras áreas poseerían formas africanas; cuarta: los humanos modernos no se mezclaron nunca ni hibridaron con los pueblos que reemplazaron; quinta: habría una discontinuidad anatómica evidente entre los fósiles humanos antes y después de la sustitución.

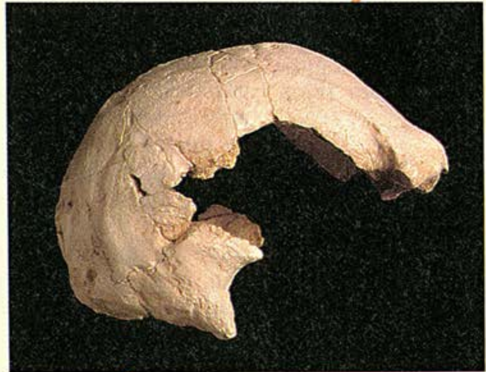
Nos extrañan las proclamas de una sustitución, ocurrida a partir de hace 200.000 años, por la que un grupo de cazadores-recolectores reemplazase a todos los demás y en todas partes. No es raro que una especie animal ocupe la vez de otra localmente en un tiempo corto, pero la pretensión de que una sustitución pueda hacerse rápidamente en todos los ambientes y climas carece de precedentes.

Sería de presumir que las poblaciones nativas gozaran de ventajas adaptativas y demográficas sobre los advenedizos. Mas, en la teoría de Eva, fueron los inmigrantes los que ganaron la mano. La magnitud de la ventaja necesaria para tal sustitución puede medirse por la supervivencia de muchos grupos de ca-

Kow Swamp (hace unos 10.000 años)



Willandra Lakes (Pleistoceno Superior)



Border Cave (Pleistoceno Superior)





Sangiran (Pleistoceno Medio)

1. TRES CRANEOS FOSILES ilustran las genealogías alternativas de un individuo moderno. Los cambios progresivos en los cráneos de yacimientos de Australasia (Sangiran, Willandra Lakes y Kow Swamp) sugieren que la población moderna de Australasia se desarrolló allí a lo largo de cientos de miles de años. La teoría de Eva pretende que un africano antiguo fue el antecesor de todos los pueblos modernos, pero podemos percibir cómo rasgos significativos del cráneo de Border Cave en Africa difieren bastante de los que caracterizan a un cráneo australiano moderno.

2. ESTA SERIE DE CRANEOS CHINOS nos pone de manifiesto la continuidad de forma, sin que se vean señales de influencia por parte de características africanas. De izquierda a derecha, cráneos masculinos de la cueva inferior de Zhoukoudian (Pleistoceno medio), Dali (Pleistoceno superior antiguo) y cueva superior de Zhoukoudian (Pleistoceno superior final).

zadores y recolectores en Australia y en las Américas; han sobrevivido a pesar de las invasiones de los europeos que llegaron en gran número durante los últimos 500 años con técnicas mucho más complejas y dotadas de mayor poder devastador.

Si en verdad ocurrieron una invasión mundial y una sustitución absoluta de todos los indígenas por los descendientes de Eva, cabría esperar dar con algunos rastros arqueológicos de las conductas que les confirieron semejante éxito. Sin embargo, examinando la arqueología de Asia no encontramos ni uno. Así, mientras el bifaz fue un artefacto común en Africa, no lo incluían las técnicas de Asia oriental, ni antes ni después de la época de Eva. No existen pruebas de la introducción de una tecnología nueva.

Geoffrey G. Pope, de la Universidad de Illinois, ha señalado que seis décadas de investigación en el registro paleolítico de Asia no han logrado desenterrar indicio alguno de culturas o tecnologías intrusas. Tipos de artefactos hallados en los primeros conjuntos paleolíticos de Asia siguen apareciendo en el Pleistoceno más tardío. Si hubiera habido un reemplazo, por invasores africanos, de las poblaciones asiáticas locales, habrían adoptado la cultura y la técnica de los pueblos que reemplazaban dejando a éstos desvanecerse sin dejar rastro.

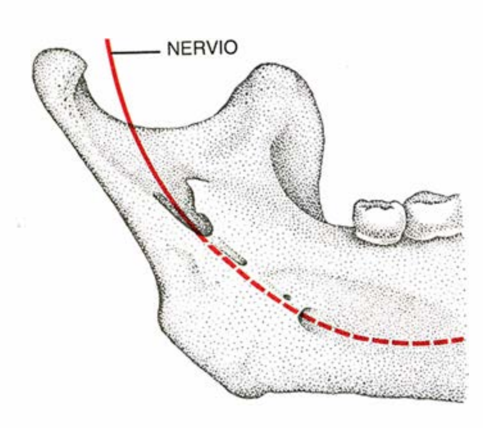
También falta base arqueológica de invasión en Asia occidental; Christopher B. Stringer, del Museo de Historia Natural de Londres, y otros creen que los primeros humanos modernos fuera de Africa residieron en los yacimientos de Skhul y Qafzeh en Israel. El magnífico registro de Qafzeh muestra, sin embargo, que esta gente "moderna" tenía una cultura idéntica a la de sus contemporáneos y paisanos neandertales: hacían los mismos tipos de utensilios líticos con las mismas técnicas y las mismas frecuencias; poseían los mismos hábitos funerarios rituales, cazaban las mismas presas e incluso seguían los mismos procedimientos de despiece. Más aún, ningún dato del tiempo en que se supone que los descendientes de Eva dejaron Africa abona la idea de la aparición de nuevas técnicas en Africa o transmitida a otros continentes. Por donde quiera que se les mire, a nuestro entender, los datos de Asia refutan las predicciones arqueológicas que implica la teoría de Eva.

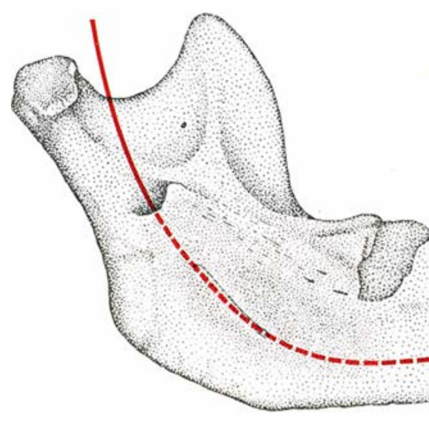
Quizá esta refutación explica por qué Wilson se vuelve a una ventaja distinta, afirmando que la invasión tuvo éxito porque los descendientes de Eva llevaban un gen mitocondrial que confería la capacidad del lenguaje. Esta proposición está aún lejos de una amplia aceptación. No sólo está en contra de la paleoneurología en lo tocante a la capacidad de lenguaje de los humanos arcaicos, sino que, de ser verdad, violaría el supuesto del reloj de Wilson de que las mutaciones mitocondriales son neutras.

Las restantes predicciones de la teoría de Eva se refieren a los bruscos cambios anatómicos y a si los primeros humanos modernos reconocibles se parecían a poblaciones regionales precedentes o a los africanos. Con los datos del registro fósil disponibles, estas cuestiones admiten una resolución inequívoca, por lo menos en dos y quizá tres regiones del mundo. Los testimonios más convincentes son de Asia meridional y septentrional.

Los homínidos fósiles de Australasia (Indonesia, Nueva Guinea y Australia) reflejan una secuencia anatómica continua durante el Pleistoceno, no interrumpida por inmigrantes africanos en tiempo alguno. Las formas distintivas de los primeros de estos restos de Java, que vivieron hace cerca de un millón de años, muestran que ya se habían desarrollado cuando la región fue habitada por primera vez.

Comparados con los fósiles humanos de otras zonas, los de Java tienen los huesos craneales gruesos, con rebordes supraorbitarios fuertes y continuos formando una barra ósea sobre las órbitas y un segundo saliente de hueso bien desarrollado en la parte trasera del cráneo para los músculos nucales. Desde encima y hacia atrás de las cejas, la frente es plana y huidiza. Estos indonesios primitivos tenían la cara ancha y





3. LA MORFOLOGIA MANDIBULAR distingue a muchos neandertales. En la mayoría de los individuos, vivos y fósiles, el borde alrededor de la abertura del canal del nervio mandibular es excavado (*izquierda*); en muchos neandertales, por contra, estaba cubierto por un puente óseo (*derecha*). Algunos europeos más modernos tuvieron también el rasgo neandertalense, aunque era menos común.





prognata con pómulos macizos y redondeados. Sus dientes son los mayores entre los humanos arcaicos de aquel tiempo.

Percibimos una serie de rasgos menores, aunque interesantes, en el más completo de los rostros y en otros fragmentos faciales que se han conservado. Entre ellos se cuentan un reborde convexo en el margen inferior de las órbitas, un borde definido en el pómulo y una salida suave del fondo nasal a la cara.

Esta morfología singular se mantuvo durante al menos 700.000 años, mientras otras características modernas seguían evolucionando en los pobladores de Java. Por ejemplo, la amplia serie de fósiles de Ngandong, cuyos datos recientes sugieren una edad en torno a 100.000 años, ofrecen pruebas palpables de que los javaneses de aquel tiempo tenían volúmenes cerebrales dentro de la gama actual, si bien se parecían notablemente a los pobladores de la región mucho más antiguos.

Los primeros habitantes de Australia arribaron allí hace más de 60.000 años. Su conducta y anatomía eran las de modernos seres humanos. Sus esqueletos evidencian el complejo de formas de Java, junto con mayor expansión craneal y otras modernizaciones. Varias docenas de fósiles bien conservados del Pleistoceno superior y Holoceno inferior demuestran que la misma combinación de rasgos que distinguían a aquellos indonesios de sus contemporáneos distingue a los modernos aborígenes australianos de otras gentes actuales.

Si los primeros australianos descendieran de africanos, como exige la teoría de Eva, la continuidad de las formas fósiles sería superficial. Todos los rasgos de los primitivos javaneses tendrían que haber evolucionado, por segunda vez, en los invasores. Aunque rara, cabe admitir la evolución repetida de un rasgo, pero la duplicación de una serie entera de rasgos sin relación resultaría improbable y sin precedentes.

Asia septentrional encierra también pruebas de una concatenación de los habitantes antiguos y los modernos. Más: las semejanzas abarcan rasgos distintos de los que adquieren importancia en Australasia; por ello, refuerzan la improbabilidad de la teoría de Eva, hipótesis que reclama la duplicación de una segunda serie completa de rasgos para una población diferente.

Los fósiles de China primitivos, de hace casi un millón de años, difieren de sus contemporáneos de Java en muchos aspectos, que paralelizan las diferencias entre asiáticos y australianos de hoy. Nuestra investigación con Wu Xinzhi y el trabajo independiente de Pope demostraron que los fósiles chinos son menos robustos y tienen rostros menores, planos y de construcción más delicada, dientes más pequeños y frentes redondeadas, separadas de los rebordes superciliares en arco. Su nariz es menos prominente y aplanada arriba. Quizás el indicio más elocuente de continuidad morfológica pertenezca a una peculiar forma de los dientes. Incisivos superiores acusadamente "en pala", que se enroscan hacia dentro por sus bordes internos, se encuentran con frecuencia excepcionalmente alta en gentes actuales de Asia oriental y en todos los restos humanos primitivos de la zona. El estudio de Tracey L. Crummett, de la Universidad de Michigan, revela la singularidad exclusiva de la forma de los incisivos de asiáticos prehistóricos y actuales.

Esta combinación de rasgos se encuentra también en la zona de la cueva de Zhoukoudian, en el norte de China, donde se hallaron hasta un tercio de todos los restos humanos conocidos del Pleistoceno medio. Como ha señalado Wu Rukang, de la Academia de Ciencias China, aun dentro de los 150.000 años o más que cubren los individuos de Zhoukoudian, pueden verse cambios evolutivos en el sentido moderno, aumento del tamaño cerebral incluido. Analizamos los ejemplares chinos y no encontramos ninguna señal anatómica de un presunto reemplazo, por formas típicamente africanas, de los chinos antiguos de aquellas regiones. Lo que sí se percibe es una suave transformación de las poblaciones antiguas en los pueblos actuales de Asia oriental.

Los paleontólogos han pensado, desde hace tiempo, que Europa aportaría las pruebas más sólidas de la sustitución de un grupo, los neandertales, por humanos más modernos. Pero también ahí el registro fósil muestra que el influjo de nuevos pobladores ni fue completo ni ocurrió sin mezcla. De hecho, el neandertal más reciente conocido, de Saint-Césaire en Francia, parece poseer rasgos de conducta propios de la gente que sucedió a los neandertales en Europa. Los primeros europeos posneandertales no tenían un patrón de formas africanas, ni arcaicas ni modernas. Los neandertales europeos no fueron totalmente sustituidos por

africanos ni por gentes de ninguna otra región.

Antes bien, lo que sugiere el registro es que los neandertales o evolucionaron a humanos más tardíos, o se hibridaron con ellos, o ambas cosas. David W. Frayer, de la Universidad de Kansas, y Fred H. Smith, de la Universidad de Illinois Septentrional, han descubierto que muchos rasgos que se dicen únicos de neandertales se encuentran en europeos que siguieron a los neandertales: pueblos del Paleolítico superior, Mesolítico y posteriores. La verdad es que sólo unos pocos rasgos de neandertal desaparecen del registro esquelético europeo posterior.

Los rasgos que persisten van desde estructuras llamativas (verbigracia, forma prominente y tamaño de la nariz de los neandertales y europeos posteriores) hasta aspectos menores (forma del occipucio y detalles de su superficie). Un buen ejemplo es la forma de la abertura del canal del nervio mandibular, donde los dentistas a menudo inyectan anestésico. La parte superior de la abertura está cubierta por un ancho puente óseo en muchos neandertales, pero otros carecen de puente. En fósiles europeos, el 53 por ciento de los neandertales conocidos tienen la forma puenteada; el 44 por ciento de sus primeros sucesores suprapaleolíticos también; sólo en el Paleolítico superior, el Mesolítico y en grupos recientes, la incidencia cae a menos del 6 por ciento.

Frente a ello, la forma puenteada aparece rarísimente en humanos fósiles o modernos de Asia y Australia. En Africa las pocas mandíbulas que datan del período sugerido de Eva no la tienen. Este rasgo mandibular y una cantidad de otros como él en el cráneo y el resto del esqueleto deben haber evolucionado dos veces en Europa para que la teoría de Eva sea correcta.

En suma, los patrones evolutivos de tres regiones diferentes —Australasia, China y Europa— muestran que sus primeros habitantes modernos no conocen el complejo de formas que caracterizan a los africanos. Carecemos de pruebas de que los africanos sustituyeran, por entero, a los grupos locales. En contradicción con las predicciones de la teoría de Eva, los testimonios denuncian, sin ambigüedad, la continuidad de varios rasgos esqueléticos entre las más primitivas poblaciones humanas y los actuales pobladores de diferentes regiones.

Si Africa fue realmente el "Jardín del Edén" del que proceden todos los pueblos actuales, habría que esperar descubrir pruebas de la transición de las formas arcaicas a las modernas allí, y sólo allí. Tras la guía de Reiner Protsch, de la Universidad de Goethe en Frankfurt, algunos paleontólogos argumentaron que el *Homo sapiens* moderno se originó en Africa porque creían que los primeros humanos de aspecto moderno se habían encontrado allí y que los rasgos raciales de los africanos modernos podían verse en esos fósiles. Pero el registro africano es disperso, fragmentario y en su mayor parte no bien datado; incluye materiales que no parecen encajar en la teoría de Eva.

Restos humanos primitivos de Africa, como el cráneo de Kabwe en Zambia, son sumamente raros y se les atribuye una antigüedad de al menos 150.000 años. Fósiles transicionales más tardíos de Marruecos, Etiopía, Kenya y Sudáfrica confirman la expectación de que en Africa se dio una modernización local, como en cualquier parte. Sin embargo, no hay en los fósiles un patrón que indique la aparición previa de rasgos esqueléticos que caractericen singularmente a los modernos humanos en general, ni aun a los africanos también modernos en particular.

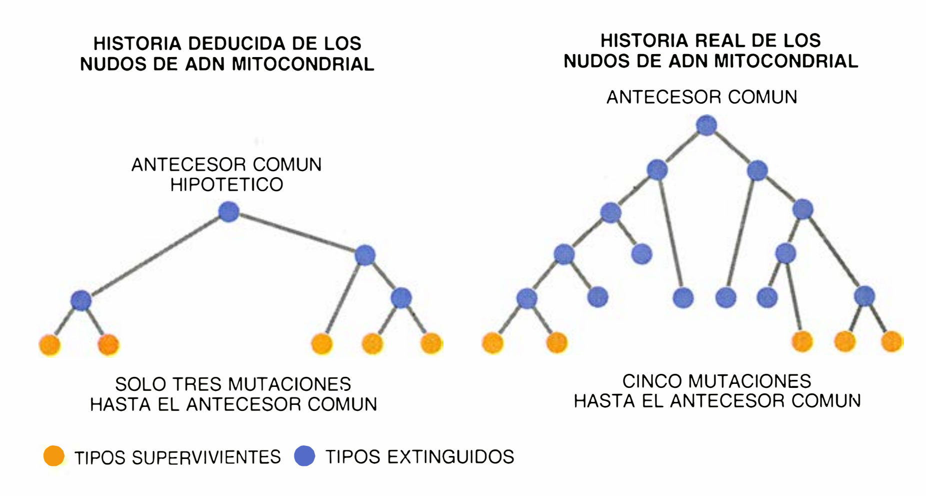
Las pruebas que respaldan la gran antigüedad de gente de aspecto moderno se fundan, sobre todo, en la interpretación de huesos procedentes de tres yacimientos arqueológi-

		EUROPA Y LEVANTE	AFRICA	ASIA ORIENTAL	AUSTRALASIA
PLEISTOCENO SUPERIOR	SUPERIOR	CRO-MAGNON PREDMOSTI MLADEC	AFALOU LUKENYA	SHANDINGDONG ZIYANG LIUJIANG	KOW SWAMP WADJAK KEILOR
	MEDIO	VINDIJA KEBARA LA FERRASSIE LA CHAPELLE	DAR-ES-SOLTAN	MABA	LAGO MUNGO 1,3 LAGOS DE WILLANDRA 50
	INFERIOR	QAFZEH KRAPINA	KLASIES	DINGCUN XUJIAYAO	NGANDONG
PLEISTOCENO MEDIO	SUPERIOR	EHRINGSDORF BIACHE ZUTTIYEH	NGALOBA FLORISBAD	DALI JINGIUSHAN	SAMBUNGMACHAN
	MEDIO	PETRALONA ARAGO STEINHEIM	KABWE NDUTU	ZHOUKOUDIAN H HEXIAN YUNGXIAN	?
	INFERIOR		BODO TERNIFINE OLDUVAI 12	ZHOUKOUDIAN D, E, L CHENJIAWO	SANGIRAN 2, 10 12, 17 TRINIL
PLEISTOCENO INFERIOR	SUPERIOR		OLDUVAI 9	GONGWANGLING	SANGIRAN 4, 27, 31
	MEDIO		LAGO TURKANA (ESTE) 992		
	INFERIOR		LAGO TURKANA (ESTE) 730, 3883, 3733 (OESTE) 1500		

4. LOS FOSILES BIEN DATADOS señalan la evolución continua y vinculante de los humanos modernos en yacimientos de todo el mundo. Grupos humanos modernos de regiones diversas desarrollaron marcas anatómicas de identidad distintas. No obstante, el flujo génico por mestizajes entre grupos bastó para mantener a los humanos en una sola especie.

cos: el de Omo, en Etiopía, el de Klasies River y el de Border Cave, estos dos últimos en Sudáfrica. Algunos individuos de Omo y Border Cave se parecen a humanos modernos, pero todos los restos son fragmentarios. La mayoría de los restos de Omo se hallaron en superficie, no en estratos datables. El cálculo de su edad, basado en técnicas de datación inadecuadas, lo consideran muchos no fiable. Algunos de los huesos de Border Cave, incluso el cráneo más completo, se extrajeron por obreros que buscaban fertilizantes; se desconoce su antigüedad. Otros huesos humanos hallados en un nivel de hace 90.000 años son químicamente diferentes de huesos de animales de ese nivel. Podría tratarse de enterramientos más recientes en la cueva.

Los restos mejor excavados proceden de la cueva Klasies River Mouth (Boca del río Klasies) y se fechan, con suficiente seguridad, entre hace 80.000 y 100.000 años. Algunos fragmentos craneales son pequeños y delicados, y se dice que "prueban" que allí había humanos modernos. Sin embargo, un análisis comparativo de toda la muestra por Rachel Caspari, del Colegio Albion, reveló que otros no son en absoluto modernos. Dos de las cuatro mandíbulas carecen de mentón, así que falta una prueba completa de mandíbula moderna. El único hueso maxilar de este yacimiento no sólo es mayor que el de los africanos actuales, sino también mayor y más robusto que los de los humanos transicionales primitivos y los humanos arcaicos descubiertos en Africa. La pretensión de que esta muestra contiene africanos modernos es muy dudosa y no justifica la proposición de que los primeros humanos modernos surgieron en Africa.



5. ILEGIMITIDAD INTRINSECA de las reconstrucciones de linajes que se basan exclusivamente en tipos actuales de ADN mitocondrial. Un árbol hipotético deducido sólo de cinco tipos supervivientes (*izquierda*) ignora las ramas e historias mutacionales de líneas extinguidas (*derecha*). Por consiguiente, sitúa el dato de un antecesor común mucho más cerca, al admitir un número insignificante de mutaciones.

Con la refutación de la teoría de la ancestralidad africana singular para los humanos actuales de muchas regiones y la falta de pruebas que demuestren que la gente moderna apareció primero en Africa, llegamos a la conclusión de que las predicciones de la teoría de Eva no pueden sustentarse. ¿Por qué, cabe entonces preguntarse, el análisis del ADN mitocondrial ha sugerido una teoría tan contraria a los hechos? Tal vez no se ha entendido bien el comportamiento del ADN mitocondrial.

La dificultad básica que entraña el empleo del ADN mitocondrial para interpretar la historia evolutiva reciente brota de la propia fuente de sus otras ventajas: en la reproducción, el ADN mitocondrial se propaga, no se recombina. Se transmite, además, por exclusiva vía materna; en consecuencia, el potencial de deriva genética —pérdida accidental de líneas— es grande: algún ADN mitocondrial desaparece cada vez que una generación no deja descendencia femenina.

La situación es similar a la que se da en la pérdida de un apellido por interrupción de la línea masculina de descendencia. Imagínese un vecindario inmigrante en una gran ciudad donde todas las familias llevan el mismo apellido. Un observador puede presuponer que todas descendían de una misma familia inmigrante afortunada que había sustituido por completo a sus vecinos (justo como se supone que los descendientes de Eva han sustituido a todos los demás humanos). La explicación alternativa diría que muchas familias inmigraron al vecindario y emparentaron; andando el tiempo, todos los apellidos menos uno se eliminaron por la eventual ocurrencia de familias sin hijos varones que perpetuaran sus apellidos. El apellido superviviente provendría de un solo inmigrante, pero todos los inmigrantes habrían contribuido a los genes de la población moderna. De igual modo, generaciones sin hijas pueden haber extinguido algunas líneas de ADN mitocondrial de los descendientes de Eva y sus contemporáneos.

Cualquier interpretación de las mutaciones de ADN mitocondrial supervivientes en las poblaciones depende, por consiguiente, del conocimiento del modo en que ha cambiado, a lo largo del tiempo, el tamaño de las poblaciones y del conocimiento de cuántas líneas maternas pudieron haber desaparecido. Las pérdidas casuales por deriva genética alteran la reconstrucción del árbol genealógico del ADN mitocondrial humano al podar trazas de antiguas ramificaciones. Cada rama no contada es una mutación que no entra en consideración a la hora de determinar cuánto tiempo hace que Eva vivió.

Ha habido cambios drásticos en los tamaños de población. En ciertas zonas del Hemisferio Norte, algunas poblaciones humanas menguaron por las fluctuaciones climáticas durante las glaciaciones. Se redujo también la población en Africa y Australia, a tenor de la arqueología. Caída de población que bien pudiera exacerbar los procesos de deriva genética y pérdida de tipos de ADN mitocondrial.

Al final de las glaciaciones, junto con la primera domesticación de animales y plantas, algunas poblaciones se expandieron explosivamente por una amplia banda de territorio entre el Mediterráneo y la costa Pacífica de Asia. Si bien el número de pobladores creció, el número de líneas supervivientes de ADN mitocondrial pudo no hacerlo: las que se perdieron desaparecieron para siempre.

Cabe, pues, esperar que haya poblaciones humanas con historias demográficas distintas que conserven diferente número de mutaciones, desde su último ADN mitocondrial antecesor común. No podemos tomarlas como una sola unidad en un modelo que da por supuesto que las longitudes de los linajes mitocondriales re-

flejan la edad de su divergencia. No se puede admitir de partida, al estilo de Wilson, que toda la variabilidad en el ADN mitocondrial de una población dependa sólo de las mutaciones; también importa la historia de la población.

El problema de la teoría de Eva estriba en que necesita un reloj molecular exacto. Su puntualidad debe basarse en los índices de mutación de muchos loci, o posiciones de genes, distintos. Pero los genes del ADN mitocondrial no se recombinan, a diferencia de los del núcleo. Todos los genes del ADN mitocondrial equivalen a un solo locus. Por consiguiente, el reloj molecular basado en el ADN mitocondrial no es fiable.

El ADN mitocondrial podría no ser lo bastante neutro para servir de base a un reloj molecular, porque algunos datos denuncian su posible implicación en ciertas enfermedades. Por pérdidas casuales y selección natural, algunos grupos vertebrados —peces cíclidos del lago Victoria en Africa, anguilas americanas, pecesgato de cabeza dura, mirlos de alas rojas, por ejemplo— tienen índices de evolución del ADN mitocondrial sensiblemente más lentos de lo que Wilson y sus colegas atribuyen a los humanos. No pocos genéticos moleculares discrepan de Wilson en la interpretación de los datos genéticos mitocondriales.

El reloj molecular de Wilson y sus colegas padece, creemos, graves problemas: la velocidad de su tic-tac se ha sobreestimado, probablemente, en unos casos y subestimado en otros. Rebecca L. Cann, de la Universidad de Hawai en Manoa, y Mark Stoneking, de la Universidad estatal de Pennsylvania, ambos discípulos de Wilson, admitieron hace poco que su reloj podía fechar el nacimiento de Eva sólo entre hace 50.000 y 500.000 años. Ante semejante inseguridad, creemos que no existe ningún reloj molecular, con cualquier intención o propósito, para el último medio millón de años o más de evolución humana.

Dejando de lado la idea del reloj, podemos interpretar los datos de la genética de una forma más razonable. En ese nuevo marco, Eva, el antecesor mitocondrial más remoto de todos nosotros, vivió antes de las primeras migraciones humanas fuera de Africa, hace por lo menos un millón de años. La dispersión de mitocondrias marcaría entonces la migración de algunos primitivos antecesores humanos a Eurasia, cuando no había allí otros homínidos. Esta interpretación de la prehistoria reconcilia el registro fósil con los datos genéticos. La investigación del futuro podría, es nuestra opinión, obtener mejores frutos si se aplicara a refutar esta hipótesis, en vez de malgastar tiempo en recalibrar un reloj que no funciona.

Las impresionantes semejanzas genéticas que comparte la humanidad entera no responden a una ancestralidad común y reciente para todos los humanos. Sí muestran las consecuencias de vínculos entre gentes, que se van prolongando hasta la primera ocupación del Viejo Mundo por nuestros antecesores, hace más de un millón de años. Son el resultado de una antigua historia de encuentros de poblaciones y emparejamientos que ha caracterizado al género humano desde su comienzo. La evolución humana ha ocurrido por doquier porque cada zona fue siempre parte del todo.

Ni el análisis anatómico ni el genético prestan soporte a la teoría de Eva. Al contrario, el registro fósil y la variabilidad del ADN mitoncodrial pueden mancomunarse para dibujar un perfil de los orígenes humanos que encaja con los datos hoy conocidos. Esta visión sintética combina las mejores fuentes de prueba sobre la evolución humana, dando sentido al registro arqueológico y paleontológico y a la información contenida en la variabilidad genética de la humanidad viviente en todo el mundo. La riqueza de la diversidad humana, que contrasta con la homogeneidad de las relaciones genéticas humanas, es una consecuencia directa de la evolución. Porque, tal como suena, nos parecemos muchísimo en lo que importa, debajo de la piel.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MODERN *HOMO SAPIENS* ORIGINS: A GENERAL THEORY OF HOMINID EVOLUTION INVOLVING THE FOSSIL EVIDENCE FROM EAST ASIA. Milford H. Wolpoff, Wu Xin Zhi y Alan G. Thorne en *The Origins of Modern Humans: A World Survey of the Fossil Evidence*. Dirigido por Fred H. Smith y Frank Spencer. Alan R. Liss, 1984.

EVOLUTION OF MITOCHONDRIAL DNA IN MONKEYS, APES, AND HUMANS. J. N. Spuhler en *American Journal of Physical Anthropology*, vol. 77, Suplemento 9: *Yearbook*, vol. 31, págs. 15-48; 1988.

THE SEARCH FOR EVE. Michael H. Brown. Harper & Row, 1990.

THE CASE AGAINST EVE. Milford Wolpoff y Alan Thorne en *New Scientist*, vol. 130, n.º 1774, págs. 37-41; 22 de junio de 1991.

Las cordilleras de plegamiento y el ciclo supercontinental

Cada 500 millones de años, los continentes se juntan en una sola masa terrestre. Las interacciones tectónicas relacionadas con la formación y ruptura de estos supercontinentes dan cuenta del origen de las cordilleras de plegamiento

J. Brendan Murphy y R. Damian Nance

En los últimos años hemos llegado, junto con otros colegas, a la sorprendente conclusión de que en el movimiento de la corteza terrestre se manifiesta un comportamiento ordenado: cada pocos cientos de millones de años, todos los continentes se congregan en una masa de tierras, en un supercontinente. Una peculiaridad de esta teoría es que puede explicar las diversas maneras de formarse las cordilleras de plegamiento existentes en el globo. También los geólogos dedicados a la reconstrucción de pretéritas situaciones geográficas de los continentes hallarán ayuda en nuestro modelo.

El conocimiento que poseemos de los continentes arranca de la teoría de la tectónica de placas, avanzada hace unos 25 años. Aportaba ella una primera explicación cabal del origen de las cordilleras de plegamiento, el desarrollo y destrucción de las cuencas oceánicas y la distribución global de terremotos y volcanes. La litosfera —capa rígida externa de la Tierra que abarca tanto los fondos oceánicos como las elevadas masas continentales— se divide en siete grandes secciones o placas; sitúanse éstas sobre la astenosfera, capa caliente y plástica del manto terrestre. El calor liberado por los elementos radiactivos del interior terrestre alimenta las corrientes de convección en las profundidades de nuestro planeta, corrientes que impulsan las placas por la superficie con una velocidad de varios centímetros por año.

Si retrotraemos los movimientos actuales, llegamos a la conclusión de que todos los continentes que bordean el océano Atlántico formaban parte de una misma masa sólida que se fragmentó hace unos 180 millones de años. El meteorólogo alemán Alfred L. Wegener, quien postuló la teoría de la deriva continental en 1912, llamó, a ese progenitor continental, Pangea (voz de origen griego que significa "todas las tierras"). La hipótesis recibió el respaldo de los geólogos cuando comprobaron que las estructuras con más de 180 millones de antigüedad encajaban por sus márgenes continentales. Los datos sobre distribución de especies vegetales y animales, así como los relativos a zonas climáticas antiguas corroboran la idea.

Pero los investigadores están cada vez más convencidos de que Pangea no fue el primer supercontinente. A principios de los años setenta, J. Tuzo Wilson, entonces en la Universidad de Toronto, señaló los fenómenos térmicos del interior terrestre como posible causa de la dispersión y posterior reunificación de un continente, mediante la periódica apertura y cierre de los océanos. Más tarde, uno de los autores (Nance) desarrolló, juntamente con Thomas R. Worsley y Judith B. Moody, de la Universidad de Ohio, el planteamiento de Wilson, proponiendo la existencia de un ciclo supercontinental con un período de unos 500 millones de años.

Una apoyatura importante para la defensa de ese ciclo reside en la aparente existencia de intensos episodios de formación de cordilleras y de ruptura continental a intervalos de aproximadamente 500 millones de años. Comenzamos por buscar confirmación de nuestra hipótesis desentrañando las notas geológicas de Pangea, el supercontinente más reciente. Aplicamos luego nuestro modelo a un período crítico de la historia de la Tierra, hace entre unos 700 y 500 millones de años, que asistió a una sucesión de episodios geológicos, asociados (se cree) a la constitución de un supercontinente anterior; durante ese intervalo se produjeron profundos cambios ambientales: alteración de la composición del agua del mar, cambios en el clima global y variaciones del nivel del mar en toda la Tierra. Estos cambios ejercieron una decisiva influencia en la evolución de los seres vivos, ya que coincidieron con la aparición de los primeros organismos multicelulares complejos, los cuales prepararon el camino para el desarrollo de las formas de vida modernas, seres humanos incluidos.

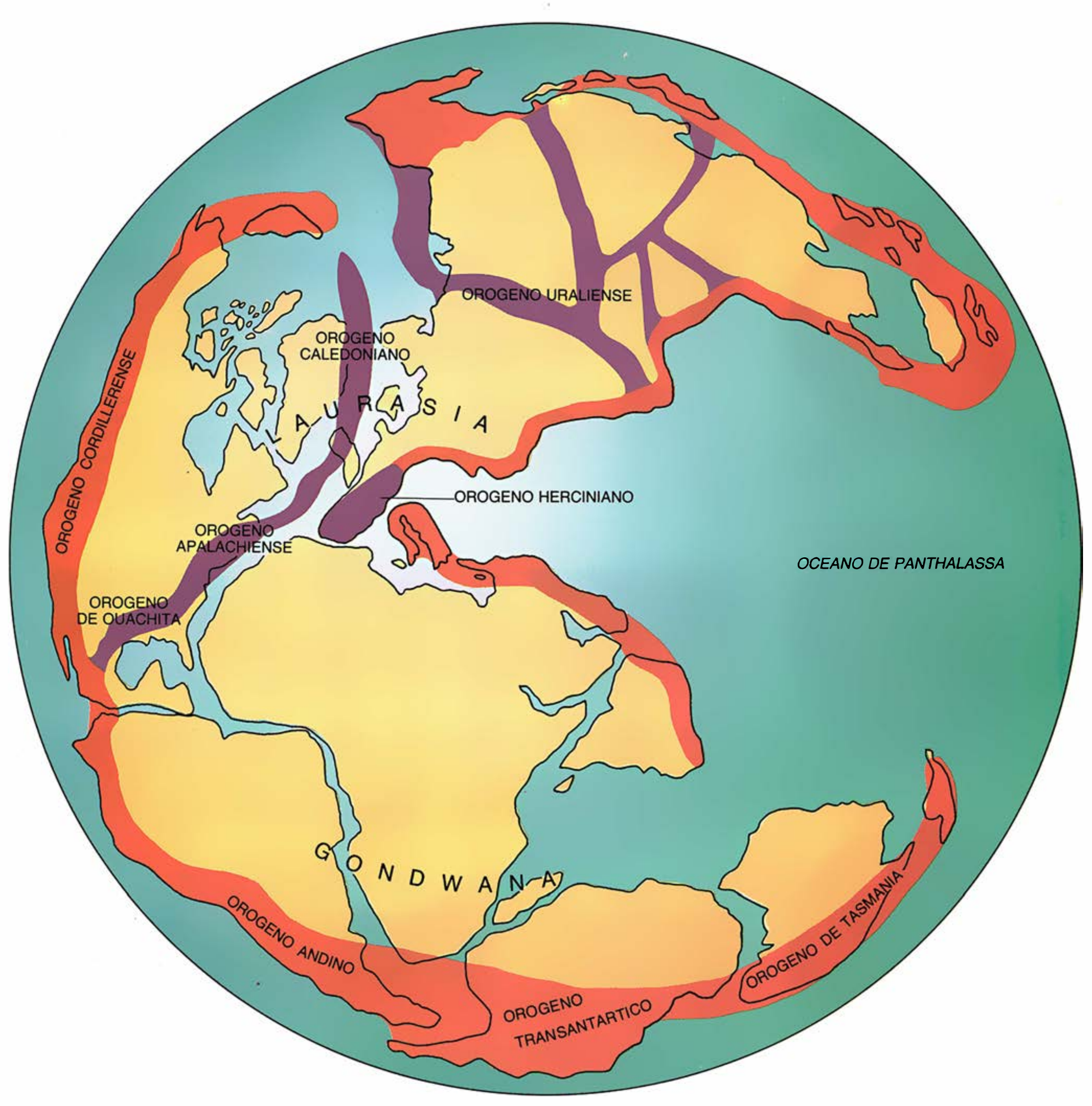
¿Que pudo haber originado la ruptura y dispersión de Pangea (o de cualquier supercontinente anterior)? Se han propuesto dos teorías complementarias para resolver la cuestión. Don L. Anderson, del Instituto de Tecnología de California, argumenta que los continentes se separan porque las rocas que los constituyen son malas conductoras del calor en comparación con los fondos oceánicos (basálticos), más delgados y densos. Los macrocontinentes, o supercontinentes, actúan, por tanto, a

J. BRENDAN MURPHY Y R. DAMIAN NANCE comenzaron a colaborar en 1985, tras conocer sus intereses comunes en el origen de las cordilleras de plegamiento antiguas de los Apalaches canadienses. Pronto se dieron cuenta de que la evolución de estas cordilleras reflejaba los procesos globales de la tectónica de placas. Murphy, un irlandés de Birr, se trasladó a Canadá en 1975, doctorándose en 1982 por la Universidad de McGill. Lo contrató luego la Universidad de San Francisco Javier en Antigonish, y allí dirige hoy el departamento de geología. Nance procede de la inglesa Cornualles. Tras doctorarse en Cambridge en 1978, estuvo enseñando en la mencionada universidad javeriana hasta 1980, de donde pasó a la de Ohio.

modo de coberteras aislantes que evitan el escape de calor del manto. Las temperaturas aumentan bajo el supercontinente de forma muy parecida a lo que sucede bajo un libro que reposa sobre una manta eléctrica. Al acumularse el calor, el material de la base de la litosfera se vuelve menos denso y abomba y agrieta el continente suprayacente. La roca fundida procedente de una astenosfera sobrecalentada penetra rápidamente por las fracturas resultantes, que irán dilatándose a medida que se distancien las piezas del supercontinente fragmentado.

El segundo modelo de dispersión supercontinental, propuesto por Andrew Hynes, de la Universidad McGill, atribuye la ruptura a los efectos de la rotación de la Tierra. Al estar constituido por una masa elevada que desequilibra la morfología de la superficie terrestre, el supercontinente adquiere un momento angular muy grande, generador de esfuerzos continuados en el interior de dicha masa que, andando el tiempo, acabarán por rasgarla y dividirla.

Es probable que ambos modelos intervengan en la ruptura del supercontinente. En uno y otro caso, el propio supercontinente es el sembrador de la semilla de su destrucción, desde el mismo proceso de su formación. El material astenosférico que rellena los espacios entre los fragmentos continentales es más denso que la corteza continental, porque el manto abunda más en hierro y magnesio. En razón de ello, cuando el magma inyectado se enfría y solidifica, tiende a hundirse; crea así un área deprimida que terminará por inundarse y convertirse en el fondo de un nuevo océano. La hendidura primitiva por donde surgió el material caliente se erige en centro de

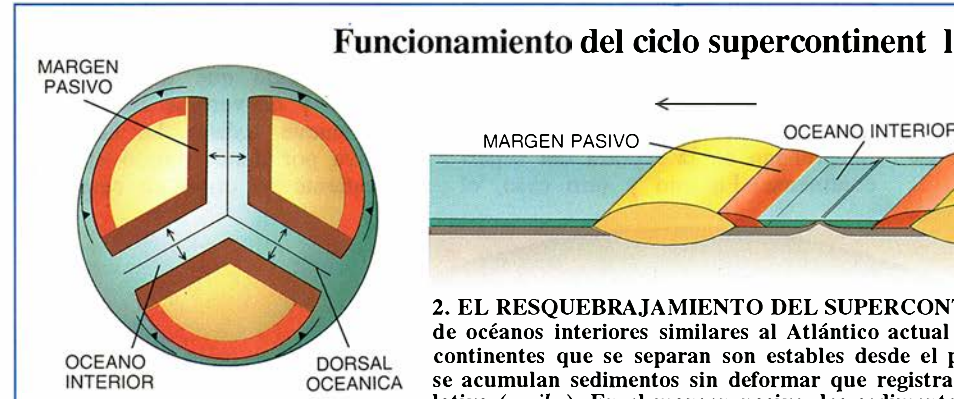


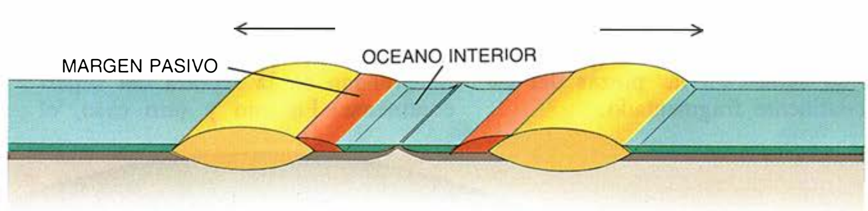
1. SUPERCONTINENTE PANGEA, hace 290 millones de años. Las colisiones continentales formaron cordilleras de plegamiento interiores (*morado*). El fondo oceánico hundido en el interior caliente de la Tierra originó volcanes y abombamientos en la periferia del supercontinente (*naranja*). Los procesos que desembocan en la aglomeración y la dispersión de los supercontinentes explican la amplia diversidad de cordilleras de plegamiento. (Dibujo de Hank Iken.)

expansión, conocido técnicamente como dorsal oceánica. Al continuar ascendiendo el material caliente por la dorsal, el océano se ensancha y los continentes derivan, alejándose uno de otro. Se trata de un fenómeno que hoy está aconteciendo en pleno océano Atlántico, allí donde se forma corteza nueva conforme ambas Américas se alejan de Europa y Africa.

La dispersión de los continentes no puede continuar indefinidamente. La corteza oceánica se enfriará y aumentará de densidad a medida que se prolongue su exposición en superficie; el suelo marino se hundirá en su retiro de la dorsal. Los científicos que estudian el fondo del Atlántico han comprobado que la edad y la profundidad del mismo crecen con su alejamiento de la dorsal Atlántica. Las rocas más antiguas del fondo atlántico, de unos 180 millones de años, se encuentran en los márgenes

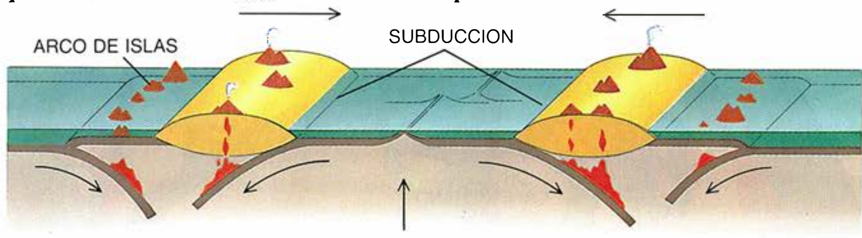
Funcionamiento del ciclo supercontinent l





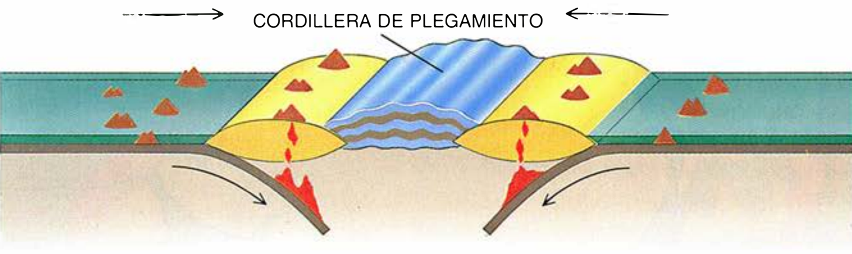
2. EL RESQUEBRAJAMIENTO DEL SUPERCONTINENTE da lugar al nacimiento de océanos interiores similares al Atlántico actual (*izquierda*). Los márgenes de los continentes que se separan son estables desde el punto de vista tectónico; en ellos se acumulan sedimentos sin deformar que registran un período de tranquilidad relativa (*arriba*). En el margen pasivo, los sedimentos continúan acumulándose hasta que los continentes alcanzan su máxima dispersión.





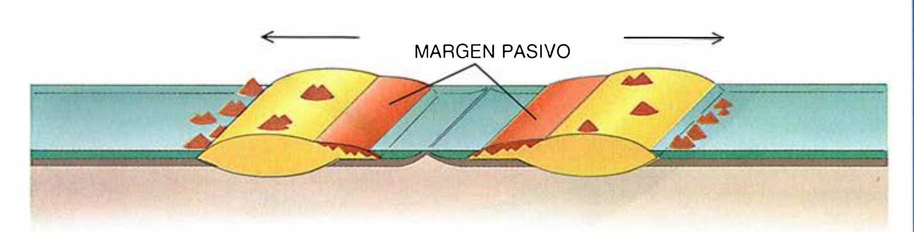
3. DISPERSION MAXIMA de los continentes. Se produce cuando los océanos interiores alcanzan una edad aproximada de 200 millones de años. Las zonas más viejas de los océanos interiores comienzan entonces a hundirse, o subducir, en el interior terrestre (*izquierda*). La subducción genera un magma que alimenta los volcanes situados en el continente suprayacente. Puede darse a la vez otro proceso de subducción en el océano exterior, formando arcos de islas detrás de las placas (*arriba*).



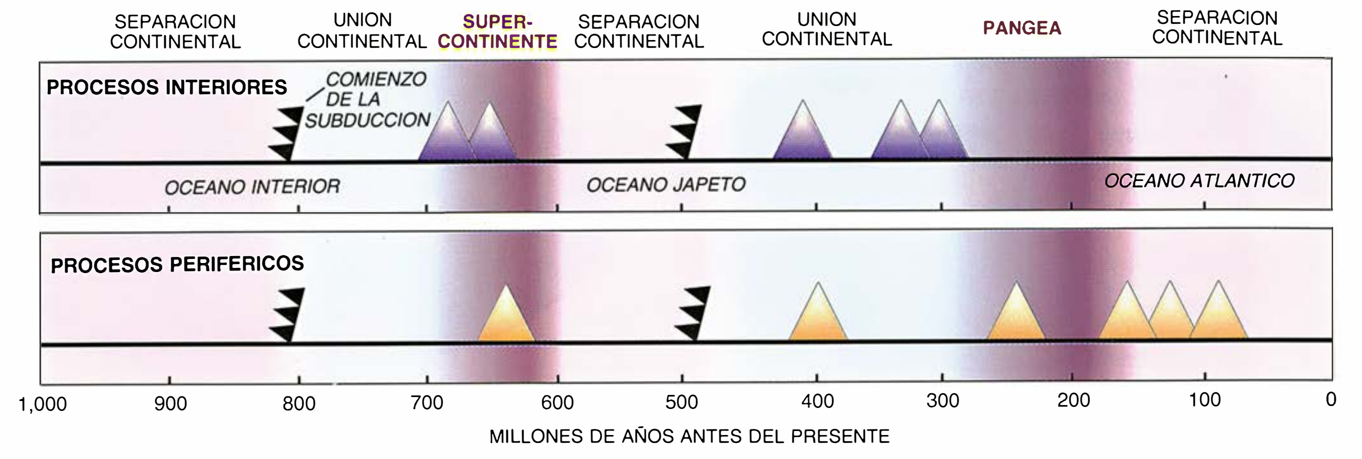


4. COLISIONES CONTINENTALES promovidas por el cierre de los océanos interiores. Los choques crean cordilleras de plegamiento interiores, así como extensas áreas con intensa deformación, levantamiento y erosión (*izquierda*). Las zonas de subducción se sitúan alrededor del borde del supercontinente. Los arcos de islas pueden provenir del océano exterior y agregarse a los bordes (*arriba*).





5. FRAGMENTACION ULTERIOR del supercontinente instada por esfuerzos térmicos y rotacionales. La subducción exterior prosigue allí donde el margen continental es ortogonal al movimiento (*izquierda, arriba*). Aparecen fallas transformantes cuando el movimiento de la placa es casi paralelo a la orientación del margen (*izquierda, abajo*). Los sedimentos se acumulan en los márgenes pasivos (*arriba*).



6. ESTE ESQUEMA CRONOLOGICO LINEAL ilustra la formación de cordilleras de plegamiento en relación con la congregación y fragmentación de los dos supercontinentes de los últimos mil millones de años. Las cordilleras se originan mediante dos tipos de procesos, interiores y exteriores. Intervienen los procesos interiores (*línea superior*) cuando chocan los continentes, creándose cordilleras de plegamiento (*conos violeta*). Los océanos interiores se abren cuando los continentes se separan, y comienzan a cerrarse con el fenómeno de la subducción. Los procesos periféricos (*línea inferior*) muestran la formación de montañas volcánicas (*conos naranja*) en los márgenes continentales al penetrar corteza oceánica bajo una placa.

del Atlántico central. Los fondos oceánicos más antiguos, situados junto a los márgenes, adquieren con el tiempo mayor densidad que la poseída por la astenosfera subyacente. Las profundas fosas oceánicas, pensemos en la de las Marianas del Pacífico, denuncian zonas de subducción, lugares donde se hunde la corteza oceánica fría y retorna al interior terrestre.

De acuerdo con los cálculos realizados por Hynes, el aumento de la densidad sobrepasa la resistencia a la subducción cuando el fondo oceánico alcanza una edad aproximada de 200 millones de años; de hecho, no se ha encontrado, en los océanos actuales, corteza con más de 200 millones de años. Cabe suponer, pues, que el Atlántico esté acercándose a su edad y anchura máximas. Dentro de unas pocas decenas de millones de años debería comenzar la subducción en zonas de ese mar donde el suelo oceánico es más viejo, junto a los márgenes continentales. Cuando tal ocurra, el borde entrará en actividad geológica, interrumpiéndose la deriva actual de los continentes hacia el exterior.

Los cambios térmicos operados en las profundidades de la Tierra contribuyen a conseguir que la subducción produzca un arrastre neto de los continentes hacia el interior. El calor acumulado originariamente bajo los supercontinentes, que culminó en la formación de una dorsal oceánica, escapa con facilidad por el delgado fondo marino. Por tanto, las piezas del supercontinente se hunden al separarse y las corrientes de convección que las impulsan acaban deteniéndose. De esta manera, la subducción en las márgenes oceánicas sirve para reunir de nuevo a los continentes dispersados. Por último, los océanos abiertos entre los continentes desaparecen y éstos colisionan: se crea un nuevo supercontinente, preparándose el escenario para el ciclo siguiente.

Basándose en la evolución deducida en el caso de Pangea, se cifra la esperanza de vida de un supercontinente en unos 100 millones de años. Los océanos que se forman cuando el supercontinente se rompe no pueden durar más de 400 millones de años, si se cierran con una velocidad aproximadamente igual a la de apertura.

Apoyándonos en conceptos del ciclo supercontinental y de la tectónica de placas, hemos desarrollado un modelo global para explicar la enorme variedad de cordilleras de plegamiento que hay en la Tierra. Y hemos sabido que la reunión y ruptura de los supercontinentes ha de crear dos tipos diferentes de cordilleras de plegamiento u orógenos (de oros, palabra griega que significa montaña). Las colisiones entre continentes pliegan y abomban la corteza; las cordilleras de plegamiento resultantes reciben el nombre de orógenos interiores, por quedar dentro de los supercontinentes tras su amalgamación. En la cordillera del Himalaya tenemos un reflejo de la colisión actual de la India con Asia. La subducción de la corteza oceánica en el margen de un continente o supercontinente alza la corteza suprayacente y dispara la actividad volcánica, produciendo tipos muy diferentes de cordilleras de plegamiento: los orógenos periféricos; de esta categoría son las Montañas Rocosas, que reflejan la subducción de las placas del océano Pacífico bajo Norteamérica occidental.

Pangea sirve para comprobar si nuestro modelo de orogénesis interior y periférica está de acuerdo con los movimientos conocidos de los continentes. Para reconstruir las posiciones de los continentes en el pasado hay varias técnicas. Algunas rocas volcánicas y sedimentarias ricas en hierro registran, al constituirse, la orientación del campo magnético terrestre, y actúan así de brújulas que revelan la latitud local en aquella época. Conocemos, además, la edad de esas rocas a través del estudio de los isótopos radiactivos. Y, por último, podemos inferir las posiciones relativas de los continentes en tiempos remotos a partir de la reunión de grandes segmentos geológicos que se han divido en una época reciente de los movimientos de las placas.

En la formación del supercontinente Pangea intervinieron múltiples colisiones a lo largo de muchos millones de años. Entre hace 420 y 380 millones de años, Laurentia (masa continental en la que se encontraba gran parte de la Norteamérica actual) chocó con Báltica (Europa). Las dos masas se unieron para formar Laurasia. Posteriormente, entre 360 y 270 millones de años atrás, Laurasia colisionó con Gondwana (integrada por segmentos de Africa, India, Sudamérica, Australia y Antártida actuales) y con Siberia. Así nació Pangea.

Esos choques destrozan las plataformas continentales de las placas afectadas. El borde de un continente cabalga sobre el del otro, originando

a HACE 500 MILLONES DE AÑOS

OCEANO JAPETO
CHINA
LAURENTIA
SIBERIA
GONDWANA
KAZAJSTANIA
BALTICA

b HACE 400 MILLONES DE AÑOS



7. HISTORIA DE PANGEA. Comenzó hace unos 500 millones de años, cuando los continentes se encontraban dispersos en el océano Japeto (*a*). Laurentia (Norteamérica) colisionó con Báltica (Europa) para formar Laurasia (*b*). Japeto desapareció al

un extenso abombamiento o plegamiento de las capas superficiales en un inicio horizontales. En virtud de ello, aumenta notablemente el espesor de la litosfera en la zona de colisión. Los esfuerzos de compresión alzan la placa superior y forman elevadas montañas.

En los sectores de colisión entre los componentes de Pangea, aparecen restos erosionados de cordilleras de plegamiento levantadas. El encuentro de Laurentia con Báltica dio lugar al cinturón orogénico caledoniano, una zona extensa y deformada que delimita la existencia de una cordillera de plegamiento erosionada que se prolonga de Irlanda al norte de Escandinavia y Groenlandia. Cuando Laurasia se estrelló contra Gondwana aparecieron cordilleras de plegamiento y fallas en el sur (orógeno de Ouachita) y este (cordillera de los Apalaches) de los Estados Unidos. Y cuando Laurasia se unió con Siberia, surgieron también cordilleras semejantes en Europa oriental: los Urales.

Las orogénesis interiores presentan ciertas características que los geólogos reconocen. Las fuerzas de choque empujan la placa cabalgada hacia las regiones más profundas y calientes del interior de la corteza terrestre. Los minerales formados en la vecindad de la superficie, tornados inestables por culpa de las mayores temperaturas y presiones que deben sufrir, se funden y ascienden a la superficie; en algunos casos reaccionan entre sí o desarrollan procesos metamórficos para formar nuevas asociaciones más estables. Las rocas metamórficas resultantes se denominan de alto grado porque sólo cristalizan en las condiciones de elevadas temperaturas y presiones que reinan cerca de la base de la corteza.

Cuando en la zona de colisión continental cesan los esfuerzos de compresión, entonces la corteza, deprimida aunque todavía poco densa, reacciona con rapidez, a la manera que emerge un tablón de madera hundido en el agua si levantamos la fuerza que lo retiene. Con los años, millones, la erosión elimina la corteza que se está levantando por esta causa, hasta que aflora en la superficie la corteza continental de alto grado, tiempo atrás situada a gran profundidad.

Por culpa de ese levantamiento en masa y de la ingente erosión a que da lugar, no suele conservarse el registro subsuperficial de las orogénesis interiores. Por contra, podrían depositarse enormes cantidades de nuevos sedimentos sobre las rocas antiguas de alto grado. Pero los expertos no encuentran dificultad en descubrir las señales de una colisión continental en caso de que estos estratos afloren.

Los sedimentos que se acumulan tras la formación de las cordilleras de plegamiento no están sujetos a los esfuerzos compresivos de sus predecesores. Serán, pues, de minerales originados a temperaturas y presiones bajas, y se estructurarán en capas paralelas poco deformadas, en neto contraste con las rocas de alto grado plegadas o basculadas infrayacentes. Las orogénesis interiores antes citadas cumplían, como cabía esperar, esas características mineralógicas, sedimentarias y estructurales.

El registro geológico contiene escasos testimonios, si alguno, de la formación de montañas en márgenes continentales antes de que Pangea comenzara a congregarse. El perímetro del océano Atlántico actual se muestra tranquilo. Los depósitos que se acumulan en estas áreas estables se denominan sedimentos de margen pasivo. Tales sedimentos se depositaron, por ejemplo, a lo largo del margen oriental estable de Norteamérica hace entre 600 y 480 millones de años. Cuando los continentes alcanzaron su separación máxima y comenzó la subducción de los océanos interiores (hace unos 480 millones de años en Norteamérica), las condiciones tectónicas sufrieron un cambio drástico. El hundimiento del fondo oceánico bajo los continentes modificó los márgenes anteriormente tranquilos e inició un período de formación de cordilleras de plegamiento.

En su penetración en la astenosfera, la corteza oceánica subducente arrastra componentes volátiles (principalmente agua) que rebajan el punto de fusión de los minerales circundantes. Este efecto, combinado con la elevada temperatura de la astenosfera, produce la fusión del material situado por encima y por debajo del bloque que se introduce. Los minerales fundidos resultantes, denominados en general magmas, suben hacia la superficie, llevando consigo el calor y su composición química distintiva. Dichos magmas adquieren la llamada composición calcoalcalina como resultado de su interacción con el oxígeno y agua arrastrados por la placa descendente.

Algunos magmas llegan a la superficie y surgen en forma de volcanes. El material que se enfría y solidifica en cámaras profundas origina rocas plutónicas (en honor de Plutón, dios romano del mundo subterráneo), granito por ejemplo. El calor y los materiales de menor densidad que suben desde el bloque introducido alzan el borde continental suprayacente, produciendo la aparición de una cadena de montañas.

La subducción y correspondiente formación de montañas asociada a la periferia de un continente pueden dar comienzo en cualquier momento, según la edad del fondo oceánico adyacente. Es evidente que la subducción acontece en los márgenes del océano interior conforme los continentes se acercan hacia su futuro en-

c HACE 300 MILLONES DE AÑOS

SIBERIA
LAURASIA
OROGENOS INTERIORES
GONDWANA

d HACE 180 MILLONES DE AÑOS



fundirse Laurasia con Gondwana, creándose Pangea (*c*). Cada colisión originó un episodio de formación de cordilleras. Los movimientos de las placas cambiaron al dispersarse Pangea. Norteamérica se encaminó hacia el norte y después hacia el oeste (*d*).

cuentro. Pero incluso cuando los océanos interiores se están cerrando, la corteza oceánica puede también hundirse en los bordes del océano exterior que ciñe al supercontinente en formación; si bien en este caso lo que ocurre realmente es que el continente se retira de la zona de subducción. Por tanto, los magmas producidos por la subducción del océano exterior atraviesan, sobre todo, corteza oceánica, mientras que los magmas de las zonas de subducción interiores se abren paso a través de la corteza continental que avanza.

El contraste entre las geometrías de la subducción interior y exterior se refleja en la composición química del material ígneo que llega a la superficie: los magmas que ascienden a través de corteza oceánica tienden a ser más ricos en hierro y magnesio y más pobres en sílice que los que lo hacen por corteza continental. Esta disparidad de composición se recoge en el distinto contenido mineralógico de las rocas resultantes, lo que nos faculta para deducir la cronología y geometría de los episodios antiguos de formación de montañas.

El material procedente de las zonas de subducción exteriores surge en la superficie del fondo oceánico a cierta distancia detrás del continente que avanza hacia adentro. Este material crea arcos de islas, o cadenas de islas volcánicas. Se cree que hace aproximadamente 470 millones de años se formó una serie de estos arcos a lo largo de la costa occidental de Norteamérica. Tales erupciones dan fe de la subducción del océano exterior. La subducción exterior podría también arrancar pequeños bloques continentales o microcontinentes de los continentes que se alejan. Las islas de Japón constituyen un ejemplo moderno de este tipo de fragmentos continentales rotos.

La formación de cordilleras en la periferia continúa después de completarse la amalgamación del supercontinente, aunque bajo condiciones muy diferentes. Producida la colisión de los continentes, la corteza oceánica se consume preferentemente en las zonas de subducción exteriores. Estas (algunas de las cuales pueden haber estado previamente en mitad del océano) tienden a situarse en la periferia del supercontinente.

Al no poder los continentes seguir alejándose de las zonas de subducción exteriores, casi todos los fundidos atraviesan ahora la corteza continental, no la oceánica. También entonces, el material caliente, menos denso, alza la corteza y origina volcanes y montañas volcánicas. Las alineaciones volcánicas resultantes recuerdan las que se formaban cuando el océano interior subducía de manera parecida bajo los continentes. El lugar exacto de la superficie donde se ejerzan esos efectos térmicos tiene que ver con el ángulo de la placa oceánica descendente.

Durante el avance de las zonas de subducción exteriores hacia el borde del supercontinente, el fondo oceánico se comporta como una cinta transportadora que retorna las cadenas de arcos de islas y microcontinentes hacia el margen continental. Paul F. Hoffman, de la Universidad de Victoria, describió las interacciones resultantes como colisiones de "topetazo y rasponazo". Las pequeñas masas terrestres pueden o bien fusionarse con el supercontinente o bien deslizarse lateralmente entre sí y con respecto a aquél. Estas colisiones producen efectos muy diferentes de los causados por la interacción entre continentes. Los movimientos de "topetazo y rasponazo" son mucho más erráticos y los microcontinentes crean sólo zonas locales con actividad tectónica en sus márgenes. Por eso mismo, las colisiones microcontinentales y las deformaciones asociadas pueden ser ocasionales, aunque la actividad volcánica ligada a la subducción se produzca con notable continuidad.

Cuando Laurentia se unió a Báltica, lo que sucedió hace entre 420 y 380 millones de años, comenzaron a colisionar los arcos de islas exteriores con el margen occidental de lo que es actualmente Norteamérica. Estas colisiones provocaron deformaciones locales, y ocasionalmente intensas, en las rocas de la región situada entre el límite de California-Nevada e Idaho (orogénesis de Antler). Al congregarse Pangea, la prolongada subducción de la periferia engendró más arcos de islas volcánicas. Parece que éstas chocaron con Norteamérica hace unos 250 millones de años. Ese episodio de formación de cordilleras de plegamiento en el noroeste de Nevada (orogénesis de Sonoma) coincide con la culminación del ensamblamiento de Pangea. La posterior formación de las Montañas Rocosas y Sierra Nevada ha velado en buena parte las pruebas de superficie de tales orogénesis antiguas.

Hace unos 180 millones de años, Pangea se agrietó, abriéndose un nuevo océano interior: el Atlántico. El efecto de la dispersión de un supercontinente depende de la orientación relativa de las zonas de subducción exteriores y de la dirección de movimiento de los continentes; y, si estas dos condiciones cursan en paralelo, podrían proseguir la subducción y los episodios intermitentes de deformación, conforme procede la apertura de los océanos interiores. Debido al movimiento hacia afuera de los continentes, los magmas de las zonas de subducción exteriores atraviesan rocas continentales, de modo similar al seguido por los de las zonas de subducción interiores

cuando los continentes derivaban hacia adentro.

Durante la primera etapa de la ruptura de Pangea, hace entre 180 y 140 millones de años, Laurasia se separó de Gondwana y determinó que la región que más adelante sería Norteamérica tomara rumbo norte. El cambio de dirección pudo haber forzado la subducción de la corteza oceánica bajo Norteamérica occidental. El registro geológico de entonces muestra un aumento evidente de la actividad volcánica y plutónica, característica de la orogénesis Nevadense en California oriental. Las rocas asociadas ofrecen una composición calcoalcalina típica de la materia fundida que asciende desde una placa subducente.

La segunda etapa de la ruptura sucedió hace unos 140 millones de años. Gondwana se dividió y Laurasia se separó en Norteamérica y Eurasia. La partición de Laurasia cambió el movimiento de la placa Norteamericana desde dirección noroeste hacia dirección oeste. Esta modificación del rumbo comprimiría las rocas continentales a medida que se obligaba a la corteza oceánica a hundirse bajo Norteamérica. El desarrollo de esos acontecimientos coincidió con una serie de pulsos de formación de cordilleras a lo largo de Norteamérica occidental, incluida las orogénesis de Sevier y Larámica, con las que comenzó la formación de las Montañas Rocosas.

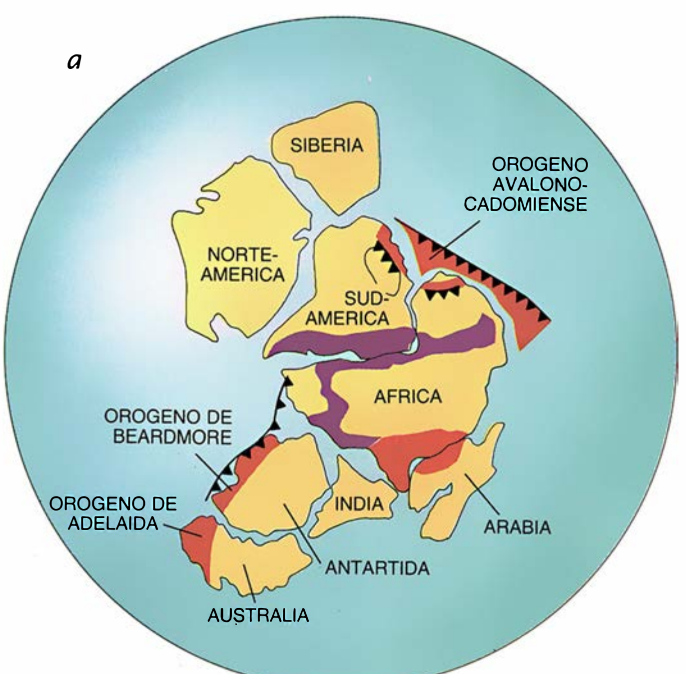
Si la zona de subducción exterior se extiende paralela a la dirección del movimiento (hacia fuera) del continente, la subducción dejará paso al movimiento lateral, convirtiéndose en una falla transversal (de desgarre). Los microcontinentes y los arcos de islas volcánicas existentes en el lado oceánico de estas fallas pueden verse transportados lateralmente lejos de su posición original; así se creó Alaska, con retales de bloques de la corteza llegados desde el océano exterior (el actual Pacífico) durante la formación y ruptura de Pangea. Estos bloques se deslizaron hacia el norte a lo largo del margen occidental de Norteamérica hasta ser atrapados en un rincón de las zonas de subducción pacíficas.

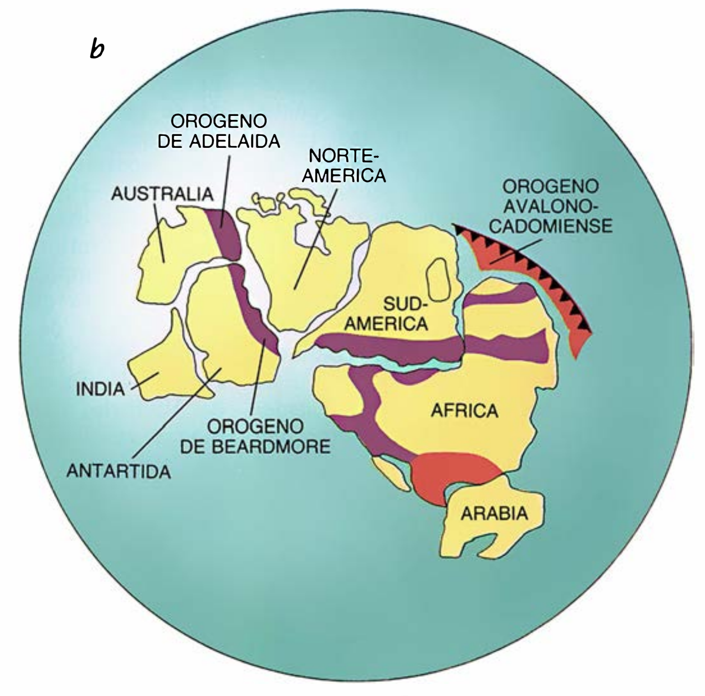
La formación de cordilleras en la periferia no implica que exista colisión de bloques continentales; de ahí, el escaso engrosamiento de la corteza, poca elevación y erosión irrelevante. En consecuencia, suelen estar bien conservados los restos de la actividad volcánica, junto con los sedimentos contemporáneos derivados de la erosión de los volcanes. La conservación de estas rocas en grandes extensiones sirve para distinguir la orogenésis periférica de la interior. Cuando se producen colisiones, intervienen por lo común bloques microcontinentales del tipo de las islas volcánicas, y la deformación resultante varía bastante de una región a otra. Por contra, las orogénesis interiores tienen lugar por colisión entre continentes y producen deformaciones más extensas y uniformes.

Nuestro análisis de la historia de Pangea integra datos inconexos de procesos orogénicos en un cuadro coherente. Parece, pues, lógico preguntarse si nuestro modelo podría dar una explicación razonable de las orogénesis relacionadas con supercontinentes más antiguos. ¿Muestran, los restos de las cordilleras de plegamiento de 600 a 800 millones de años, signos de procesos periféricos e interiores iguales que los que configuraron Pangea 500 millones de años más tarde?

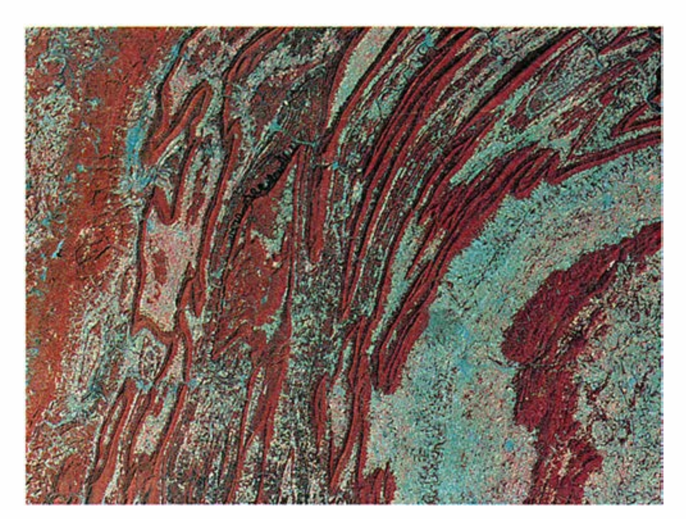
Para contestar esta pregunta hay que salvar numerosos obstáculos. Los afloramientos de rocas anteriores al ciclo de Pangea son muy escasos. Las mediciones paleomagnéticas ven notablemente mermada su credibilidad cuando se trata de las rocas más antiguas. Además, muchas formaciones geológicas del pasado remoto se han desmembrado y recompuesto en múltiples ocasiones. Pero ello no debilita nuestro convencimiento de que muchos rasgos, aparentemente confusos, de las viejas cordilleras admiten explicación rastreando en los signos de orógenos periféricos e interiores.

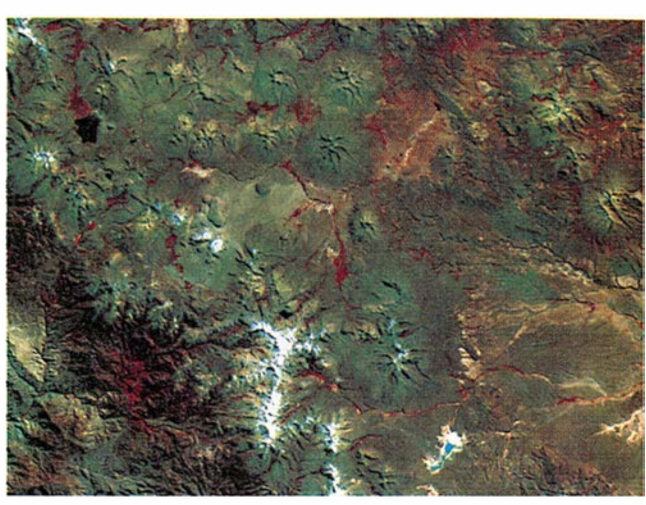
La historia de los primeros supercontinentes comenzó, más o menos, hace unos mil millones de años, con la acumulación de sedimentos en los márgenes pasivos de los bordes de los continentes que se separaban. Hace unos 820 millones de años,





8. CIERTA RECONSTRUCCION de los supercontinentes exige que las cordilleras de plegamiento de Adelaida y Beardmore nacieran por subducción periférica (*a*). A tenor de otro modelo de reconstrucción, esas cordilleras se originarían por colisión continental (*b*). Los autores del artículo creen que su modelo de orogénesis dependiente de la formación del supercontinente ayudará a perfilar los límites de las dos hipótesis precedentes, amén de servir para cribar otras.





9. IMAGEN OBTENIDA POR SATELITE de la cordillera de los Apalaches en Pennsylvania (*izquierda*) que nos revela la disposición normal de las estructuras en cordilleras de plegamiento, característica de una orogénesis interior. La vista de los Andes peruanos (*derecha*) nos muestra una cordillera volcánica con disposición más desordenada, fruto de un proceso de subducción periférica de la corteza oceánica bajo Sudamérica occidental.

empezó la subducción, casi contemporánea, en los océanos interiores y exteriores (las zonas de subducción primitivas se ubicarían en medio del océano exterior, donde no dejaron huellas). Los arcos de islas, fusionados más tarde con los bordes de los continentes, dan fe del inicio de la subducción. La subducción de unos océanos interiores en cierre progresivo provocó erupciones volcánicas, sobre todo a lo largo de los márgenes continentales, restos de cuya actividad (ocurrida hace entre 820 y 800 millones de años) hallamos todavía en Brasil y Africa occidental. El cierre absoluto de los océanos interiores supuso el choque entre continentes, lo que sucedió hace unos 650 millones de años; se remató entonces la unión supercontinental.

Las señales indicadoras de dichas interacciones yacen en los grandes bloques de corteza continental antigua (de más de un millón de años), llamados cratones, que son los núcleos estables de los continentes actuales. Hay allí cicatrices, de hasta 1000 kilómetros de diámetro, de inmensas orogénesis interiores que recuerdan las tremendas colisiones que tuvieron lugar al amalgamarse el primer supercontinente.

Los movimientos continentales unieron los cratones de Africa occidental y Guayana hace entre 675 y 650 millones de años, impacto cuyos efectos se evidencian en la orogénesis Mauritánide-Bassáride-Rokélide de Africa occidental. Los afloramientos de rocas de alto grado testifican la presencia de cordilleras de plegamiento que el tiempo acabó por erosionar. Las cordilleras de plegamiento Transahariana y de Damara (en Africa meridional) se originaron por colisiones de otros cratones. Persisten las consecuencias de otros episodios de choque de la misma época en el este de Sudamérica, Australia oriental y la Antártida.

Todos los cinturones orogénicos muestran señales de intensa deformación, cabalgamientos y engrosamiento cortical, distintivos de las orogénesis interiores promovidas por colisión de continentes. En Africa occidental y Sudamérica oriental abundan las rocas calcoalcalinas (de la subducción de los océanos interiores) y las rocas metamórficas de alto grado (de la ulterior compresión de los cratones). Suprayacentes a las las rocas orogénicas retorcidas, reposan sedimentos más jóvenes con geometría tabular simple, prueba de una importante elevación seguida por intensa erosión. La suma de estos rasgos confirma la incidencia, en extensas áreas del globo, de las colisiones entre continentes (orogénesis interiores) hace entre 675 y 600 millones de años.

Para probar la presencia de orogénesis periféricas contamos con otros testigos. Al cerrarse los océanos interiores, los continentes se alejaban del océano exterior en expansión, formándose numerosas islas volcánicas en la zona de subducción exterior. Las islas colisionaron posteriormente con Sudamérica septentrional, con Africa occidental y con Africa septentrional. Quedan señales de la diversidad de estilos e intensidad de las deformaciones causadas por los choques. La fusión del supercontinente, hace unos 650 millones de años, renovó y aceleró la subducción en sus márgenes.

El cinturón orogénico Avalono-Cadomiense, cordillera erosionada que ocupa la costa oriental de Norteamérica y parte de Europa occidental, nació probablemente de un proceso de subducción periférica. Los datos aportados por la geología y el paleomagnetismo sugieren que, hace 600 millones de años, este cinturón ceñía a Sudamérica y Africa del noroeste, en el borde del antiguo supercontinente.

El orógeno Avalono-Cadomiense comprende grandes volúmenes de rocas volcánicas de bajo grado asociadas a rocas sedimentarias, de 650 a 600 millones de años de edad. En esta región, la mayoría de las rocas presentan sólo una ligera deformación y, en muchos casos, se disponen casi concordantes con los estratos suprayacentes. La falta de una deformación generalizada y la conservación de las rocas volcánicas y sedimentarias de bajo grado corroboran la escasa alteración sufrida por la corteza en estas regiones. Características que, por otro lado, son las presumidas en una orogénesis periférica. La presencia de ciertas deformaciones intensas de ámbito local puede atribuirse a las colisiones con arcos de islas y microcontinentes. Coincidiendo con la ruptura del supercontinente, desaparecieron las huellas de la subducción, borradas por fallas de desgarre hace unos 550 millones de años.

La actual península Arábiga se constituyó probablemente por la misma época, fruto de la actividad orogénica periférica. La región que ocupa consta de un mosaico de bloques microcontinentales; sus abundantes rocas volcánicas y plutónicas asociadas —señales inequívocas de las erupciones de los arcos de islas— datan de hace 820 a 740 millones de años. Entre los bloques se conservan láminas de corteza oceánica antigua,

a modo de bocadillos gigantescos. Sobre las rocas descansan estratos más modernos, cuya edad es de 640 a 600 millones de años.

De esta mezcolanza de materiales inferimos que el caso de la península Arábiga es una versión, más antigua, de lo sucedido con Alaska: una colcha de retales fabricada con restos de arcos de islas volcánicas surgidos en el océano circundante del supercontinente. Una vez fragmentado este último, los movimientos transversales de las placas arrastraron las piezas hasta el norte de Africa, soldándose allí para dar lugar al escudo arábigo actual.

Hace aproximadamente de 575 a 550 millones de años, aparecieron grandes espesores de sedimentos de margen pasivo, casi simultáneamente en diversas regiones terrestres. Era el aviso de que había empezado la ruptura del supercontinente. Los continentes, en su dispersión, iban perdiendo calor y comenzaban a sufrir procesos de subsidencia. En tal hundimiento, quedaban anegados por las aguas marinas, creándose extensas plataformas continentales. Ese escenario hipotético se corresponde con el registro geológico de la época. Así, observamos, en muchas regiones, vastas acumulaciones de estratos sedimentarios que hablan de una elevación global del nivel del mar, con deposición de sedimentos en asentamientos apenas modificados. Los sedimentos de margen pasivo constituyen el registro estratigráfico que ha servido a los geólogos para descifrar los episodios posteriores de actividad tectónica y formación de cordilleras de plegamiento relacionados con la formación de Pangea.

Reina todavía cierta confusión sobre buen número de las características del supercontinente que precedió a Pangea. No hay acuerdo entre los expertos sobre las paleolatitudes de muchas regiones del supercontinente (Norteamérica y Sudamérica, por ejemplo). La reconstrucción propuesta por Ian W. D. Dalziel, de la Universidad de Texas en Austin, y otra similar de Hoffmann, atribuye a la subducción periférica la formación de la antigua cordillera de Mozambique, al tiempo que sugiere que los choques interiores entre los continentes terminarían por engendrar los orógenos de Adelaida (Australia) y Beardmore (Antártida).

Gerard Bond y sus colegas, del Observatorio Geológico de Lamont-Doherty, proponen una reconstrucción continental diferente, con un desarrollo orogénico totalmente opuesto. Aunque el antagonismo habrá de disolverse en el futuro mediante el perfeccionamiento de los estudios paleomagnéticos, nuestro modelo de orógenos interiores y exteriores podría servir de puente. Un examen atento del estilo de la actividad orogénica en estos cinturones debería facilitar la decisión entre las dos reconstrucciones.

Más difícil resulta empeñarse en recrear supercontinentes que les precedieran. Podemos, sin embargo, deducir la edad de las orogénesis interiores más representativas (que indicarían la fusión de un supercontinente) y los pulsos responsables de la fragmentación ("rifting"). Según parece, las colisiones continentales seguidas por episodios importantes de "rifting" acontecieron en pulsos temporales datables, aproximadamente, entre hace 2700 y 2500, 2100 y 2000, 1700 y 1500, 1100 y 1000 millones de años. Aunque esas fechas carecen de una seguridad firme, nos sugieren que los ciclos supercontinentales constituyeron una nota distintiva y permanente de la evolución de la superficie terrestre durante largo tiempo.

Los cinturones orogénicos descritos en este artículo se conocen desde hace tiempo. Nuestro trabajo intenta explicarlos integrados en su contexto global. El reconocimiento de procesos orogénicos periféricos e interiores diferenciados y la identificación de la posición de cada uno de ellos configuran el marco idónico donde abordar el desarrollo de las cordilleras de plegamiento. Nuestro modelo habrá de auxiliar a quienes se dedican a la reconstrucción cartográfica de los continentes de antaño y al estudio de los esfuerzos tectónicos que han dado forma a la historia de nuestro planeta.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

EL CRECIMIENTO DE NORTEAMERICA. David L. Jones, Allan Cox, Peter Coney y Myrl Beck en *Investigación y Ciencia*, n.º 76, págs. 30-45; enero de 1983.

PALEOZOIC PALEOGEOGRAPHY OF NORTH AMERICA, GONDWANA, AND INTERVENING DISPLACED TERRANES: COMPARISONS OF PALEOMAGNETISM WITH PALEOCLIMATOLOGY AND BIOGEOGRAPHICAL PATTERNS. Rob Van der Voo en *Geological Society of America Bulletin*, vol. 100, n.º 3, págs. 311-324; marzo de 1988.

SUPERCONTINENT MODEL FOR THE CONTRASTING CHARACTER OF LATE PROTEROZOIC OROGENIC BELTS. J. Brendan Murphy y R. Damian Nance en *Geology*, vol. 19, n.º 5, págs. 469-472; mayo de 1991.

DID THE BREAKOUT OF LAURENTIA TURN GONDWANALAND INSIDE-OUT? Paul F. Hoffman en *Science*, vol. 252, págs. 1409-1412; 7 de junio de 1991.

Perfiles

John Horgan

MURRAY GELL-MANN: *el Ulises solitario de la física de partículas*

No resulta sorprendente que Murray Gell-Mann, un eminente teórico, tenga explicación para su increíble campo de intereses. En tanto que la mayoría de la gente es o "apolínea" (fría y analítica) o "dionisíaca" (comprometida e intuitiva), él combina ambos rasgos constitucionales. "A eso le llaman algunos 'odíseo'. Es una manera de ser poco habitual", confiesa.

Gell-Mann ha cumplido 62 años y da clases en el Instituto de Tecnología de California. Este experto en física de partículas, galardonado con el premio Nobel, es uno de los principales arquitectos del modelo estándar, teoría que explica el comportamiento de las partículas subatómicas y las interacciones entre ellas. Entre otras contribuciones, propuso que los protones y los neutrones, los constituyentes principales de la materia, están compuestos por otras partículas más fundamentales, los quarks.

Pero la física le viene estrecha a la cabeza inquieta de Gell-Mann. La enumeración de sus intereses abarca 17 páginas, y van desde "la historia natural (especialmente, la ornitología), gramática histórica, arqueología, historia y psicología profunda hasta el pensamiento creativo", pasando por "cuestiones políticas relacionadas con la calidad del entorno planetario (sobre todo, la conservación de la diversidad biológica), la contención del crecimiento demográfico, el desarrollo económico viable y la estabilidad del sistema político mundial".

Admite que se ha excedido. Y ha calculado en cuánto. "Son 50 veces más de lo que uno puede hacer, y trabajo a un 2 por ciento de rendimiento. Así que cada día estoy luchando contra un factor de 2500, y cada día me retraso en ocho años. El noventa y ocho por ciento de mi tiempo se me escapa."

Naturalmente, queda poco margen para las entrevistas. Una semana se convierte en anfitrión y conferenciante del centenario del Caltech. La semana siguiente viaja a Europa a un simposio de física. Los ratos perdidos los dedica a escribir un libro, titulado *El quark y el jaguar*, que versa sobre su principal interés: la interacción en la naturaleza entre fenómenos simples, como los quarks, y los complejos, como los jaguares. Pero Gell-Mann tiene una mañana libre en este último viaje a Nueva York. Quedamos citados para el almuerzo.



Antropólogo de afición, Murray Gell-Mann nos explica en su despacho del Instituto de Tecnología de California cómo jugar al wari, entretenimiento de Africa occidental. Fotografía de James Aronovsky.

En Manhattan, este sesentón robusto de pelo blanco y gafas negras se mueve con soltura. Diríase que está en casa. Y lo está. Al igual que otros físicos prominentes de su generación, nació y creció —eran inmigrantes judíos provenientes de Europa— en la ciudad de Nueva York. Su manera de hablar, aunque sea cosmopolita y un modelo de erudición, conserva aún el dejo de Nueva York.

Echamos una ojeada a su juventud. Ingresó en la Universidad de Yale en 1944, recién cumplidos los 15 años, y se graduó cuatro años después junto con otro triunfador, George Bush. Aunque frecuentaban círculos diferentes en Yale, Gell-Mann y Bush se conocieron más tarde cuando fueron regentes de la Institución Smithsoniana. Bush es "un chico agradable" que da "fiestas muy buenas", dice Gell-Mann. "Sólo quiero que alguien le encuentre un oficio mejor que dirigir el país."

Gell-Mann quedó desazonado cuando no consiguió una ayuda financiera aceptable del programa para físicos graduados de la Ivy League. Temía que el Instituto de Tecnología de Massachusetts, que le ofreció un puesto de ayudante del físico Victor F. Weisskopf, fuera un "sitio mugriento", un criadero de ingenieros más que de verdaderos científicos. "Pero fui allí, y estaba bien", dice Gell-Mann. Weisskopf resultó ser "una persona encantadora y un excelente físico".

Tras obtener su doctorado en el MIT a principios de 1951, luchó por encontrar un orden bajo la abigarrada variedad de hadrones que producían los aceleradores de partículas. Los hadrones son partículas sujetas a la fuerza nuclear fuerte, que mantie-

ne unidos los protones y los neutrones en los núcleos atómicos. Dio por fin con una propiedad cuántica que predecía con exactitud el comportamiento de los nuevos hadrones exóticos, y la llamó extrañeza.

Siguiendo con esa intuición, Gell-Mann erigió un sistema de clasificación de partículas que llamó el camino de las ocho vías, como la senda budista hacia la sabiduría. El término avivó la noción, popular en los años sesenta, de que la física de partículas y el misticismo oriental estaban profundamente ligados. Gell-Mann rechaza esa confusión. Su alusión al budismo (otro de sus intereses) era una simple "broma que alguien tomó en serio".

Podría, me confiesa, haber seguido la tradición y crear "nombres pomposos y decentes para las cosas, basados en los griegos y todo eso. Sé cómo hacerlo. Pero abundaban los que se fundaban en ideas que acabaron siendo falsas. 'Protón', por ejemplo, que significa primero. 'Atomo', que alude a lo que no se puede cortar. Todas estas cosas ¡resultaron ser erróneas! Así que pensé que sería mejor buscar algo juguetón".

Se le concedió el premio Nobel en 1969 por su trabajo sobre la extrañeza y el camino del octeto. Mientras tanto, cinco años antes, había inventado una teoría mucho más comprehensiva (también propuesta, independientemente, por un antiguo alumno suyo, George Zweig). De acuerdo con la misma, neutrones, protones y todos los demás hadrones se componen de partículas más elementales, los quarks. Estos se mantienen unidos por unas partículas mediadoras de fuerza bautizadas (no por Gell-Mann) con el nombre de gluones.

Se le nota con ganas de aclarar dos explicaciones falsas que corren sobre la historia de los quarks. La primera, que él no se limitó a robar el neologismo de *Finnegans Wake*. Al principio buscaba algo que resonara como "kwork" y formara pareado con "fork". Sólo entonces, cuando releía el libro de James Joyce —lo que ha hecho con frecuencia desde su publicación en 1939—, se encontró con la frase "three quarks for muster mark" y decidió adoptar la ortografía de Joyce. (Gell-Mann señala que "quark", en el sentido que lo usa Joyce, evoca tanto un cuartillo de cerveza como el grito de la gaviota.)

Luego está la atribución que se le hace de haber concedido entidad "matemática", más que "real", a los quarks. La introducción de esa distinción obedecía a su creencia de que se llegaría a descubrir que los quarks están permanentemente "atrapados" en los hadrones por los gluones, y sería, pues, imposible detectarlos individualmente. "No quería entrar en discusiones con los filósofos, que son una pesadilla terrible, muchos de ellos, con sus logomaquias: '¿Cómo? ¿Real? ¡Pero no puede mostrarse! ¿Qué es lo que entiende usted por real?'"

Desde hace diez años ha ido dejando el trajín diario de la física de partículas. Es un animador —más que uno de los creadores activos— de las supercuerdas, hipotéticas partículas extremadamente pequeñas cuyos culebreos originaron, se supone, todas las partículas y fuerzas observables de la naturaleza, la gravedad incluida. Afirma tener un sentimiento de paternidad hacia las supercuerdas, ya que su trabajo en la teoría de la dispersión, allá por los años cincuenta, influiría en la concepción del primer modelo de cuerdas.

Más directa fue su implicación en una versión de la mecánica cuántica que pueda ser aplicada en la cosmología. El trabajo brotó en parte de una propuesta de Stephen W. Hawking, de la Universidad de Cambridge, y de James B. Hartle, de la Universidad de California en Santa Bárbara, según la cual el universo entero puede describirse en términos de una ecuación cuántica, o función de onda. Pero hay un escollo, no superado: la función de onda describe un abanico de caminos posibles para la partícula, y la partícula "escoge" un camino sólo cuando alguien la observa. Si la partícula es el universo entero, ¿quién es el observador y dónde está?

A finales de los cincuenta, Hugh Everett III, de la Universidad de Princeton, inventó una versión de la mecánica cuántica sin observador, llamada la interpretación de los universos múltiples. Sostenía que la partícula sigue todos los caminos descritos por su función de onda —en diferentes universos. Con Hartle, un antiguo alumno, Gell-Mann está desarrollando la interpretación de las historias múltiples, una versión modificada de la idea de Everett.

Gell-Mann se ha convertido en estudioso entusiasta de la complejidad, de la que él dice que agrupa los principios sobre los que descansan absolutamente todos sus demás anhelos e intereses. A principios de los ochenta ayudó a fundar el Instituto de Santa Fe, en Nuevo México, donde los investigadores estudian "sistemas complejos adaptables", tales como el lenguaje, el cerebro y las economías estatales. Ha intentado dejar su huella en este campo proponiendo un nuevo término, "pléctica", que remite al estudio de la simplicidad y de la complejidad en todas sus manifestaciones. (El término no ha calado todavía, quizá por culpa de su raíz griega.)

Hemos llegado al aeropuerto y se nos está acabando el tiempo. Apenas si hemos tocado la faceta política de Gell-Mann, que se remonta a su infancia. En 1944 se incorporó tarde a la Universidad de Yale, de modo que pudo trabajar como voluntario en la campaña para la reelección del presidente Franklin D. Roosevelt. En 1960, como asesor científico del Pentágono, ayudó a formular la política que condujo a los Estados Unidos y la Unión Soviética a la limitación de armamentos.

Me las arreglo para abrir brecha en la lingüística histórica. "Soy bastante bueno en lingüística", asegura. Ha dirigido una obra, y escrito la introducción y un capítulo de la misma, sobre el particular. Allí apoya la teoría de Joseph H. Greenberg, de la Universidad de Stanford, según la cual se puede construir un árbol genealógico de todas las lenguas del mundo analizando sus razones de semejanza. Algunos lingüistas —gramáticos profesionales, dedicados a tiempo completo— arguyen que las pruebas lingüísticas de Greenberg no respaldan las conclusiones a las que llega. Gell-Mann no se muerde la lengua: "Es una opinión tan estúpida que me pregunto cuántos seres humanos adultos la van a adoptar."

Mientras entrega su equipaje en el mostrador del aeropuerto neoyorquino, me confiesa su temor de que no le quede suelto para tomar un taxi desde la terminal californiana hasta su casa. Le dejo 40 dólares y Gell-Mann me extiende un cheque. Al dármelo, me sugiere que considere la posibilidad de no cobrarlo porque su autógrafo puede ser "bastante valioso".

Gell-Mann se apresura entonces hacia la puerta de embarque, "Me gusta ser el primero del avión", dice. Mientras le sigo, me armo de coraje para espetarle que otros científicos, aun reconociendo su ingenio, sugieren también que es, bueno, una especie de sabelotodo. "No sé qué quieren decir con eso", me responde por encima del hombro. Pocos segundos más tarde declara: "¡Es cierto, sé mucho de un montón de cosas!".

Ciencia y sociedad

Sida

En la mujer

Aunque la mayoría de los sidosos y portadores del virus de la inmunodeficiencia humana sean varones, la epidemia se está difundiendo con rapidez entre las mujeres: de la decena larga de millones de personas infectadas, casi la tercera parte son mujeres. Las estadísticas denuncian una curva ascendente, en éstas, de embarazadas. El examen médico de quienes se incorporan a la fuerza de trabajo descubre que existe una situación de paridad entre hombres y mujeres portadores.

Como sucede con otras enfermedades de transmisión sexual, lo normal es que el contagio del sida llegue a la mujer a través del varón, más que de otra forma. A la vulnerabilidad biológica de la mujer se le suma frecuentemente la despreocupación respecto a si su compañero sexual tiene o no el HIV, lo que en muchos casos hace que ella ni siquiera se percate del riesgo que corre. Entre ellas, además, es menor que entre los hombres la probabilidad de advertir que se padece la infección antes de que aparezcan sus síntomas. Y, aun cuando éstos se muestran ya, a menudo los médicos tardan en diagnosticar la infección vírica.

Por otro lado, entre las mujeres es mayor que entre los hombres la probabilidad de provenir de medios humildes, sin acceso a terapias que prolongan la vida; por ejemplo, a la profilaxis contra la pneumonía por *Pneumocystis carinii* y a la medicación antirretrovírica.

Estas realidades biológicas y sociales se han combinado para hacer que la mujer esté sensiblemente infrarrepresentada en la investigación clínica sobre el virus del sida. En numerosas ocasiones constituyen las únicas proveedoras del sustento de sus hijos y se hallan ante un sistema sanitario que frecuentemente desatiende necesidades tan perentorias como son el cuidado de los niños, la gratuidad de los transportes y el poder contar con apropiados servicios culturales.

Las diferencias regionales que aparecen en la sintomatología clínica de la inmunodeficiencia causada por HIV obedecen a patógenos oportunistas locales, factores alimentarios y factores inmunosupresores. No se ha prestado idéntica atención a las diferencias ligadas al sexo. Pero comienzan a salir estudios que ponen de manifiesto la progresión de la enfermedad entre las mujeres. En Rhode Island hemos observado que los primeros indicios clínicos en más de la tercera parte de un grupo de más de 200 mujeres lo constituían infecciones vaginales recurrentes, producidas por *Candida albicans*. Las investigaciones realizadas en el Centro Médico Downstate de Brooklyn, han encontrado tumores cervicales en muchas mujeres infectadas a la vez con HIV y con papilomavirus humano (HPV). Se ha puesto de manifiesto también una gran frecuencia de verrugas recurrentes y recalcitrantes (producidas por ciertas cepas de HPV) en la región genital de mujeres infectadas con el HIV.

Las interacciones oncogénicas entre el HIV y el HPV requieren un estudio detenido. Y lo mismo ocurre con las pelvitis morbosas. Se ignora si las sidosas son más propensas a contraer este tipo de enfermedades y, supuesto que lo sean, si es menos probable que respondan bien a la terapia ordinaria. El que no se reconozcan síntomas específicos para las mujeres puede retrasar el diagnóstico y, con ello, impedir que se determine el estado inmunológico de una paciente y que se le apliquen terapias adecuadas.

Aun después de mostrar síntomas de una enfermedad asociada al HIV que responda a los criterios vigentes para la diagnosis del sida, una mujer puede encontrar otras barreras que le impidan recibir prometedoras terapias experimentales. Muchos protocolos de investigación ordenan que se hagan rutinarios tests de embarazo y eliminan de las pruebas a las mujeres si resulta que están embarazadas.

Arrastramos todavía muchas secuelas de una era paternalista. En pocos procesos de investigación se fija la responsabilidad de los machos con respecto a la inseminación de las hembras mientras son hombres los participantes en tales estudios; ni se evalúan por lo común los efectos de las drogas sobre el semen.

Está prendiendo la idea de la necesidad de profundizar en las enfermedades vinculadas al sida en las mujeres. Pero aún queda mucho por hacer para subsanar las injusticias que soportan las mujeres infectadas de HIV. En algunas partes de Africa, a la epidemia heterosexual se la ha llamado la enfermedad de la abuela, porque la generación de los más viejos asume la responsabilidad de cuidarse del creciente número de niños cuyas madres han muerto víctimas del sida. Como la curva demográfica de la epidemia del sida en Occidente se va pareciendo cada vez más a la experiencia africana, debemos ponernos a aprender rápidamente las lecciones del Africa, de modo que nos capacitemos para reducir en seguida al mínimo los estragos sociales y los terribles daños físicos producidos por este virus letal. (Kenneth H. Mayer y Charles C. J. Carpenter, directores del programa SIDA de la Universidad Brown.)

Técnicas nucleotídicas

Nuevas alternativas a la RCP

La multiplicación ("amplificación") de ácidos nucleicos se ha convertido, en poco tiempo, en una operación esencial para el progreso de la biología molecular. La herramienta técnica actual, tipificada por la reacción en cadena catalizada por la polimerasa (RCP), ha permitido multiplicar ácido desoxirribonucleico (ADN) extraído de hojas fósiles de magnolia de 18 millones de años de antigüedad, ADN de mamuts siberianos que la congelación ha conservación durante 10.000 años, así como de momias egipcias y de restos humanos óseos de más de 5000 años de antigüedad.

La RCP consiste en una reacción enzimática en cuya virtud se aumenta selectivamente la concentración de una secuencia específica de ácido nucleico en relación a la de otras secuencias presentes en la misma mezcla de reacción.

El proceso se desarrolla en tres etapas, cuya repetición cíclica conduce a la multiplicación exponencial de la secuencia escogida. Estos tres pasos son: desnaturalización de la doble hebra de ADN a elevada temperatura (95 grados C), acoplamiento complementario de cebadores oligonucleotídicos sintéticos a las regiones

adyacentes de la secuencia seleccionada presente en las dos hebras antiparalelas de partida, a temperatura menor (40-75 grados C) y, por último, elongación de los cebadores a partir de sus extremos 3' catalizada por una ADN polimerasa termoestable como la *PolI* de *Thermus aquaticus*, que copia las respectivas secuencias complementarias de ADN a cuyos extremos se hallan acoplados los cebadores.

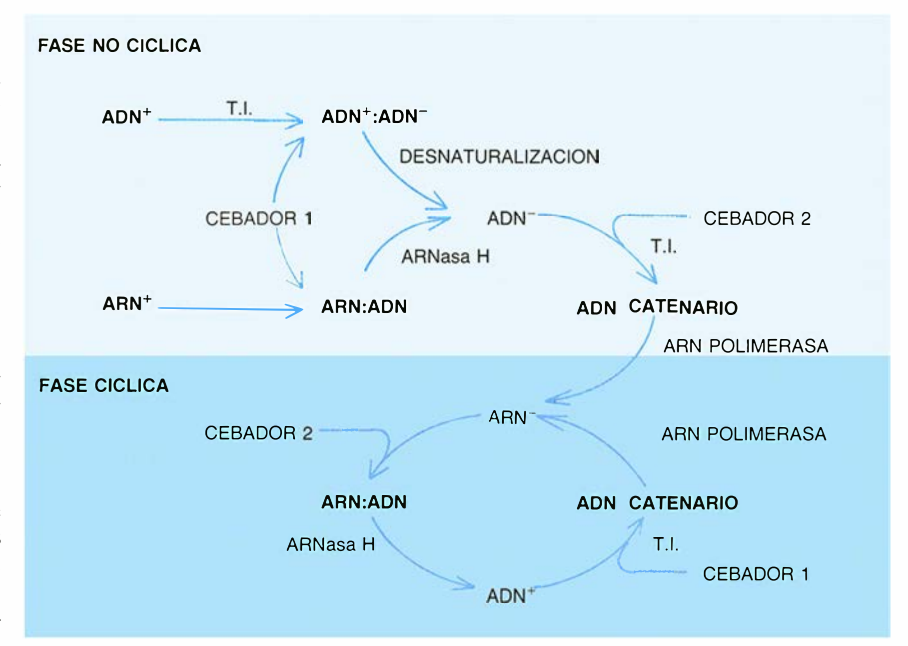
La reiteración del ciclo térmico determina que la secuencia bicatenaria flanqueada por los cebadores iniciales, sintetizada en el primer ciclo, sirva de molde para nuevas "amplificaciones" en los ciclos sucesivos. Habida cuenta que en cada ciclo se dobla el número inicial de secuencias de ADN, en una veintena de ciclos consecutivos se alcanzan niveles exponenciales de acumulación de la secuencia de ADN seleccionada de partida. Una de las limitaciones de esta metodología es que requiere cambios térmicos bruscos y rápidos que sólo pueden conseguirse mediante instrumentos termostatizados diseñados especialmente para operar de manera cíclica y variar el gradiente de temperatura con celeridad.

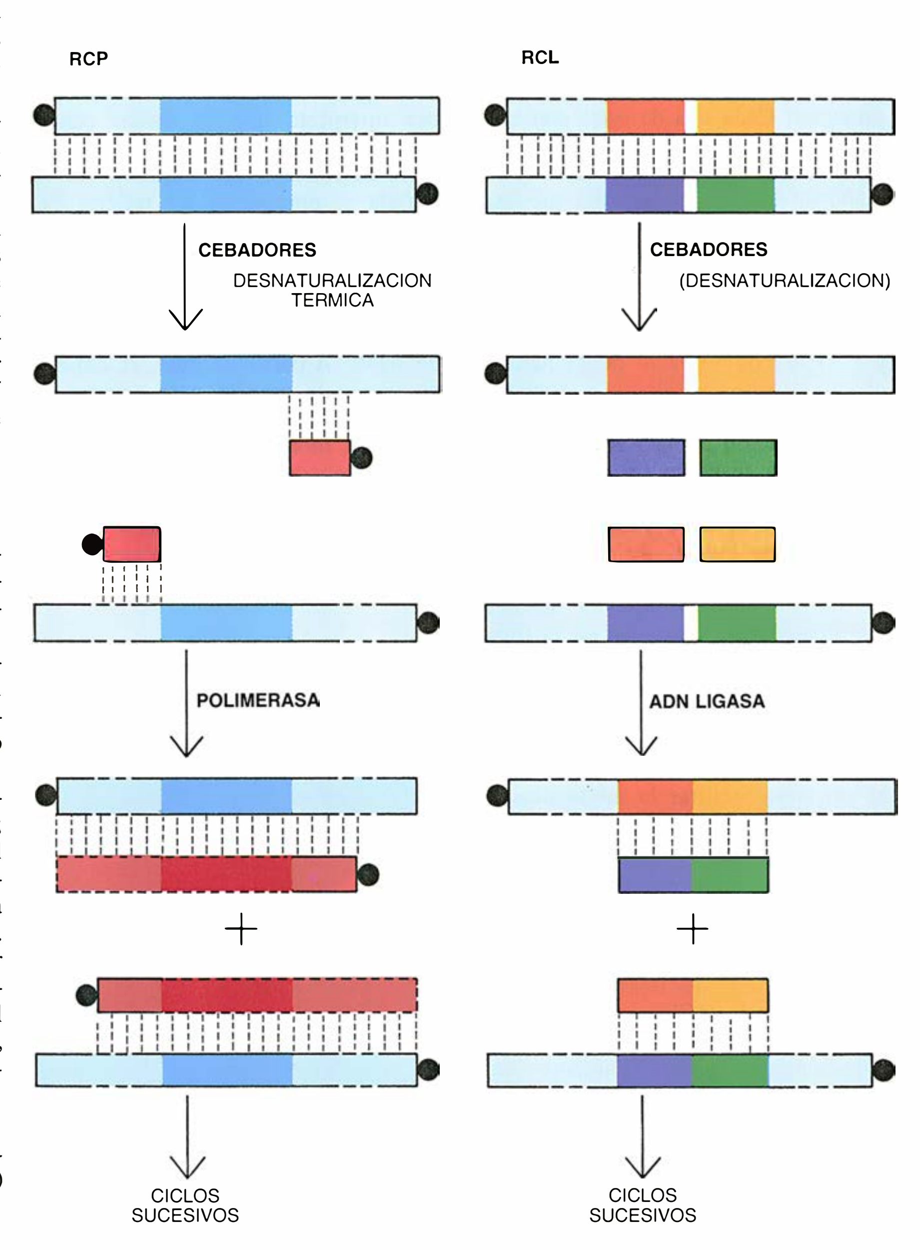
El gran impacto ocasionado por la nueva tecnología de la RCP y las innumerables aplicaciones a las que ha dado lugar han promovido una afanosa búsqueda de técnicas alternativas que igualen a aquélla o, a ser posible, mejoren su eficiencia. Aquí nos limitaremos a describir dos de ellas.

NASBA

La técnica de amplificación de ácidos nucleicos dependiente de secuencia (NASBA) utiliza cebadores oligonucleotídicos específicos; se aplica a la multiplicación continua de ácidos nucleicos, en una sola mezcla de reacción y a una única temperatura. Se trata, pues, de un proceso isotérmico.

El primer cebador posee una longitud de alrededor de 45 nucleótidos; de éstos, los 20 correspondientes al extremo terminal 3' son complementarios de la región 3' de la secuencia de ADN que se desea amplificar. El otro extremo (5') del cebador contiene un elemento promotor reconocido por la ARN polimerasa del bacteriófago T7. El segundo cebador, que consta de unas 20 bases, deri-





Técnicas de multiplicación de ácidos nucleicos: NASBA (arriba), *RCP* (izquierda) *y RCL* (derecha)

va del extremo 5' de la secuencia a iterar.

En la fase inicial de la reacción, el cebador que contiene al promotor se acopla a la secuencia seleccionada, ya sea de ADN o de ARN; se produce su elongación, desde el extremo 3', mediante una transcriptasa inversa (T.I.) con la subsiguiente formación de un híbrido bicatenario. En el caso de un híbrido de ARN:ADN, la ribonucleasa H presente hidroliza la cadena de ARN y crea una hebra de ADN a la que se acopla el segundo cebador, que, a su vez es elongado por la primera enzima, sintetizándose una segunda cadena complementaria de la primera y portadora de la secuencia promotora. El resultado final de este paso de la reacción es una estructura bicatenaria de ADN.

Una tercera enzima presente en la mezcla, la ARN polimerasa de T7, sintetiza copias de ARN a partir de la región promotora del primer cebador, ahora transcripcionalmente activa; se producen hasta 100 copias de la secuencia molde, que encierra al promotor. Cada una de estas copias de ARN sirve a su vez de molde de síntesis para la transcriptasa inversa, iniciándose la fase cíclica del proceso.

En esta segunda fase, el segundo cebador se acopla también a la cadena de ADN sintetizada en la primera etapa, permitiendo a la transcriptasa inversa generar moléculas híbridas, portadoras de réplicas de la anterior cadena y que se liberan a continuación en forma monocatenaria con la intervención de la ARNasa H presente en la reacción (al igual que en la primera fase). A estas últimas cadenas se acopla el cebador que incluye al promotor, de nuevo elongado por la transcriptasa inversa, con lo que se aportan nuevas moléculas bicatenarias y activas en la transcripción.

Hemos descrito de manera independiente los distintos pasos de la reacción por mor de mayor claridad. Pero no olvidemos que concurren a la vez para facilitar la multiplicación selectiva de la secuencia que nos interesa y hacerlo de manera continua, homogénea y en condiciones isotérmicas.

El proceso NASBA requiere menos ciclos que el de la RCP para producir un número de iteraciones determinado. En la RCP se dobla el número de moléculas por cada ciclo, requiriéndose aproximadamente unos 20 ciclos para obtener una "amplificación" de un millón de veces. En la NASBA, cada paso de transcripción genera 100 copias de ARN; por tanto, en 4 ciclos se consigue un nivel de amplificación comparable.

RCL

La reacción en cadena de la ligasa (RCL) emplea también oligonucleótidos cebadores que se acoplan a la secuencia de ADN escogida para iterarla. A diferencia de la RCP, donde los cebadores flanquean la secuencia seleccionada, en la RCL los oligonucleótidos se superponen en la secuencia y la cubren casi por entero.

Se sintetizan dos conjuntos de cebadores, el primero rigurosamente complementario de una mitad de ADN bicatenario, que incluye la secuencia a multiplicar; y, el segundo conjunto, complementario de la otra mitad, de suerte que, al acoplarse, las hebras del ADN molde dejen un pequeño hueco central sin cubrir. En un primer paso, se separan las hebras del ADN de partida a elevada temperatura (95 grados C). A continuación, se procede a acoplar los dos conjuntos de cebadores, bajando la temperatura a 65 grados C e incorporando, en la mezcla de reacción, una ligasa termoestable. Dicha enzima interpreta que el hueco central dejado por los 4 cebadores es una incisión fortuita que requiere ser reparada y procede a su relleno con desoxinucleótidos; se produce así la unión covalente de los dos conjuntos de cebadores.

El resultado de acción ligadora es la formación de dos nuevas cadenas de ADN. A partir de aquí, se calienta de nuevo la mezcla para separar las cuatro hebras de ADN, convertidas ahora en molde para nuevos conjuntos de cebadores. La iteración o repetición sucesiva del proceso consigue que se duplique en cada ciclo el número de copias de la secuencia de ADN a multiplicar.

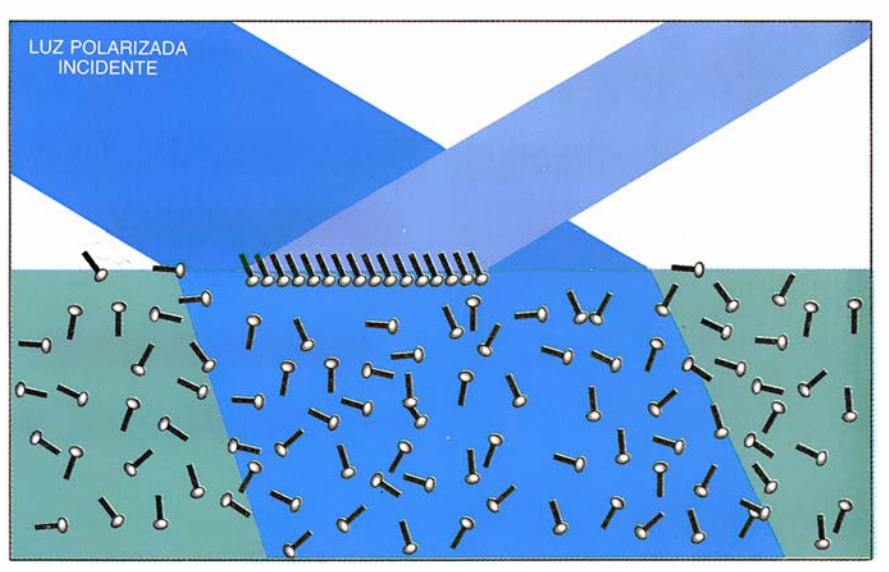
La característica más sobresaliente de la RCL reside en la gran especificidad de la enzima, ya que la ligasa sólo une aquellos cebadores que son estrictamente complementarios de la secuencia de ADN sometida a amplificación. Si los cebadores resultasen acoplados a secuencias muy parecidas, aunque no idénticas a la seleccionada, la enzima no los reconocería; en consecuencia, ni unión, ni, por ende, duplicación de las secuencias que no fueran estrictamente homólogas. (Lluis Cornudella, profesor de investigación del CSIC.)

Capa monomolecular

Observación en directo

La observación de los fenómenos naturales con ayuda de instrumentos resultantes del progreso de la técnica es uno de los caminos prometedores de la física moderna. Da una nueva vida a fenómenos conocidos desde hace mucho tiempo y mal explicados. Con esa esperanza nos hemos acercado a la difusión de moléculas disueltas y posterior formación de una capa monomolecular en la superficie de la solución. Era la primera vez que se observaba la constitución de una "película de Gibbs" en directo y sin añadir trazadores que perturben el fenómeno.

En una interfase agua-aceite o en la superficie libre del agua, las moléculas "anfófilas", con una parte hidrófila (soluble en agua) y otra hidrófoba (insoluble en agua), pueden formar películas compuestas por una única capa molecular: su parte hidrófila se coloca en el agua y su parte hidrófoba se dispone en el aceite o

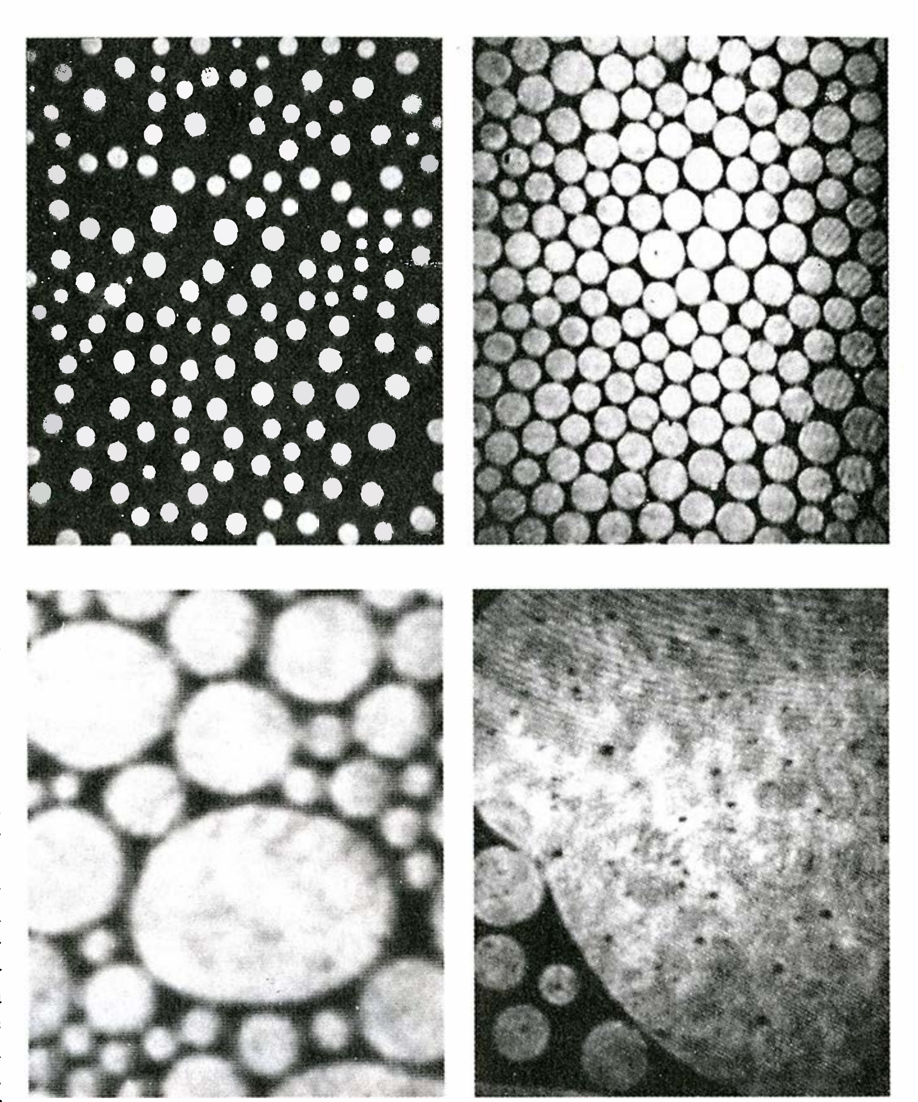


PRINCIPIO de observación de ángulo de Brewster.

en el aire. Según la longitud de la parte hidrófoba y la afinidad por el agua de la cabeza hidrófila, las moléculas anfófilas pueden ser solubles o no en agua. Las películas formadas en las interfases agua-aire se denominan películas de Langmuir, si están constituidas por moléculas insolubles en agua (por ejemplo, el ácido esteárico), y películas de Gibbs, cuando las moléculas son solubles en agua (como el dodecilsulfato de sodio).

Estas películas interesan a los físicos porque son sistemas de dos dimensiones que a veces tienen un comportamiento más simple que el de los sistemas tridimensionales. Desde hace un siglo se estudian sus propiedades termodinámicas, y especialmente, la presión de superficie (es decir, la diferencia entre la tensión superficial del agua pura y la de la interfase agua-aire recubierta por una película) en función de la densidad de moléculas en la superficie.

Algunas de estas propiedades han hecho pensar rápidamente en la existencia, en estas películas, de transiciones de fase de primer orden análogas a la evaporación o a la solidificación del agua. Pero hubo que esperar a los años ochenta para poder observar dichas transiciones, a la microscopía de fluorescencia, que revela las heterogeneidades de densidad de las películas; en esta técnica se mezclan pequeñas cantidades de impurezas fluorescentes y anfófilas a las moléculas que forman la película. Estas impurezas no se reparten por igual en las diversas fases de la monocapa: cuanto más densa y organizada es una fase, menos impurezas incorpora.



FORMACION de una película de moléculas anfófilas en la superficie de una solución donde estas moléculas están disueltas.

La técnica no deja de presentar sus inconvenientes: la adición de impurezas al sistema modifica los diagramas de fase, y sobre todo, perturba las formas de los dominios de fase en coexistencia. Este efecto se acentúa por el hecho de que las impurezas fluorescentes absorben mucho la luz, lo que provoca efectos fotoquímicos durante la observación. Por otra parte, algunas observaciones son difíciles, quizás imposibles, mediante esta técnica: en especial no se puede estudiar la transición entre dos fases densas donde las impurezas son demasiado poco solubles o son demasiado viscosas para que sean expulsadas durante la transición.

Hemos puesto a punto un microscopio que permite también visualizar variaciones de espesor o densidad muy pequeñas en las películas sin necesidad de añadir impurezas.

Nuestro microscopio utiliza las propiedades de reflexión de la luz polarizada: con ángulo de Brewster, 53 grados para una interfase agua-aire, la intensidad de la luz reflejada se anula cuando la luz incidente está polarizada en el plano de incidencia. Esta extinción sólo es total para una interfase perfecta, sin espesor ni rugosidad: toda perturbación de la superficie, como la presencia de una película monomolecular, produce la reflexión de una cantidad de luz tanto mayor cuanto más densa, espesa u organizada es la monocapa.

En nuestro microscopio de ángulo de Brewster, la interfase agua-aire está iluminada a 53 grados por un haz de luz paralelo que procede de un láser de argón ionizado. Un objetivo, igualmente inclinado a 53 grados con relación a la superficie del agua, recoge la luz reflejada y forma la imagen de la película en una cámara de vídeo. Como la superficie del agua debe formar un ángulo de 53 grados con el plano de puesta a punto, la imagen sólo es nítida en una franja estrecha; para obtener un campo suficiente se deben formar sucesivamente imágenes nítidas de franjas contiguas y yuxtaponerlas. Lo lograremos con ayuda de un microordenador que controle el motor de puesta a punto, y asegure el registro y el tratamiento de imágenes. Nuestro microscopio permite obtener, para uno de los objetivos disponibles, una imagen de 800 × 1000 micrometros con resolución de 2 micrometros, en 2,5 segundos por la yuxtaposición de 25 franjas de 40 micrometros de anchura cada una.

Nos servimos de este microscopio para estudiar las etapas de formación de una película de Gibbs en la superficie de una solución de moléculas anfófilas. M. Dervichian en 1933 y posteriormente M. Aratono y sus colegas de la Universidad de Kyuchu estudiaron las variaciones de tensión superficial en el equilibrio para soluciones anfófilas en función de la concentración de la solución. Observaron que la curva que representa

estas variaciones ofrece, para numerosos compuestos anfófilos, un cambio de pendiente para concentraciones muy bajas. La ley de Gibbs indica que esta discontinuidad de pendiente corresponde a un cambio brusco de la densidad de la película.

Ante una concentración inferior a la concentración del cambio de pendiente, la película tiene poca densidad —"gaseosa"—; para una concentración superior es mucho más densa, o "líquida". Sufre, pues, una transición de fase de primer orden, es decir, con coexistencia de las dos fases. Si la superficie de una solución no tiene inicialmente una película, las moléculas disueltas se difunden hacia la superficie y forman en ella una monocapa cuya densidad aumenta progresivamente hasta alcanzar el valor de equilibrio. Cuando la concentración es inferior a la concentración del cambio de pendiente, la película es un gas (bidimensional) cuya densidad aumenta con el paso del tiempo pero que permanece homogénea; cuando la concentración de la solución es superior a la concentración en el cambio de pendiente, la película comienza siendo gaseosa, pero se vuelve líquida, pasando, pues, por una transición de fase. Esta evolución se ha registrado con ayuda de nuestro microscopio.

Durante los primeros instantes la película, gaseosa, refleja débilmente la luz. Aparecen luego puntos luminosos: son pequeños dominios líquidos repartidos aleatoriamente sobre la superficie. Estos dominios circulares crecen y, a partir de un tamaño determinado, se organizan en una red hexagonal, que aún presenta numerosos defectos. Este reparto ordenado se explica por el hecho de que los dominios líquidos se repelen mutuamente: la disociación de las moléculas anfófilas iónicas en iones cargados negativamente en la superficie y en iones positivos, que permanecen en la solución, a poca distancia de las cabezas cargadas negativamente, produce dipolos verticales en la película; así M. Andelman, de la Universidad de Tel Aviv, F. Brochard, del Colegio de Francia, y J. F. Joanny, del Instituto Le Bel de Estrasburgo, han demostrado que la presencia de dipolos en las películas genera fuerzas de largo alcance que pueden conducir a una organización hexagonal.

Los dominios dejan de crecer, aunque aumenta su número: las interacciones dipolares adquieren tal intensidad que las "gotas de líquido" se deforman. Finalmente, todos los dominios se unen de forma brusca y simultánea, volviéndose la película uniformemente líquida.

El tiempo de formación de la película es mucho mayor que el que se calcula para una difusión de moléculas anfófilas del volumen hacia la superficie, pero no se comprende el origen del fenómeno ralentizador. La formación de la película se vuelve tan lenta, en la aproximación de la concentración de transición, que las medidas de tensión superficial se tornan muy difíciles. Hay que esperar algunos centenares de horas para que se alcance el equilibrio. (Sylvie Hénon y Jacques Meunier, del laboratorio de física estadística de la Escuela Normal Superior, de París.)

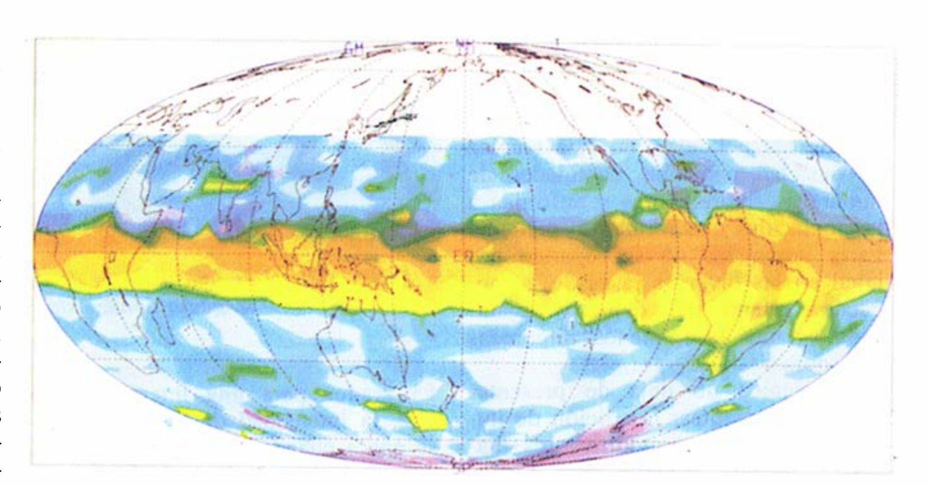
Capa de ozono

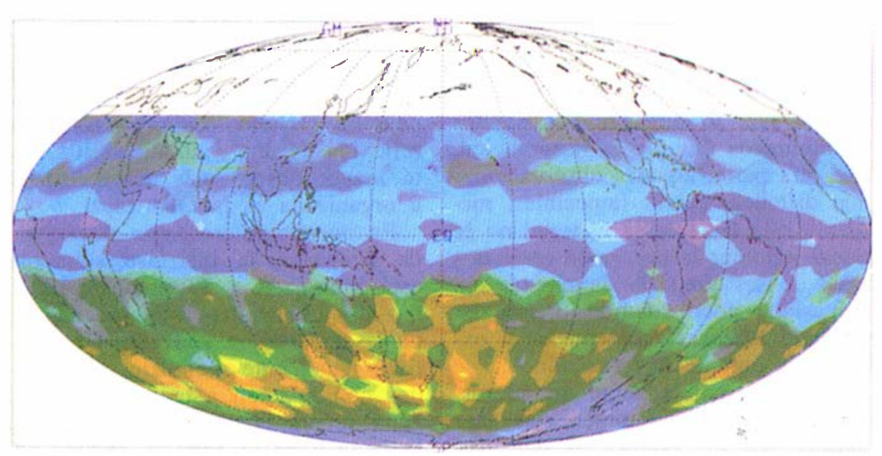
Influencia de las erupciones volcánicas

De manera rutinaria, por el obvio interés general que encierran, la NASA viene publicando las imágenes, sintetizadas con los datos recabados por satélite, del agujero de la capa de ozono de la Antártida. El ozono estratosférico protege nuestro planeta de la radiación ultravioleta; puede ésta agostar las cosechas, inducir cáncer, producir cataratas y perturbar el sistema inmune. Los sistemas de vientos se encargan luego de recomponer los niveles de ozono y el problema desaparece de los titulares de los periódicos hasta la primavera antártica siguiente.

Pero la historia comienza a variar su patrón. El 6 de octubre del año pasado la NASA registraba en la Antártida los niveles de ozono más bajos nunca medidos, indicio de su progresivo ensanchamiento. Pocos días después, las Naciones Unidas denunciaba el creciente debilitamiento de la capa, incluso lejos de los fríos contornos de la estratosfera polar; por ejemplo, en los veranos de las latitudes medias, densamente pobladas, cuando maduran las cosechas, la gente sale al aire libre y el sol aprieta.

Por si fuera poco, la erupción del volcán de Pinatubo ha contribuido a acelerar la erosión del ozono estratosférico de las mismas regiones tro-





NUBE QUE CIÑE EL GLOBO, emitida por la erupción del Monte Pinatubo. Siguió su desenvolvimiento un resonador de la banda de microondas incorporado a bordo del Satélite de Investigación de la Atmósfera Superior, lanzado por la NASA en 1991. La nube era rica en dióxido de azufre (banda naranja, izquierda) *y pobre en ozono* (banda violeta, derecha). *Imágenes de Joe W. Waters.*

picales. Según datos provisionales de la NASA afirman, la erupción del Pinatubo podría eliminar un 30 por ciento del ozono en las latitudes medias, con los efectos mencionados, que se dejarán sentir en Estados Unidos y Europa.

La intervención de las erupciones volcánicas en la pérdida de ozono estratosférico fue propuesta en 1989 por Susan Solomon y David J. Hofmann, de la NOAA (Oficina Nacional para la Investigación Oceánica y Atmosférica). El ozono desaparece en las reacciones catalizadas por el cloro, que se dan especialmente en la superficie de unos pequeños cristales de hielo que forman las nubes estratosféricas polares. (La principal fuente del cloro estratosférico son los halocarburos, CFC.) Solomon y Hofmann argumentaban que los derivados de azufre emitidos por los volcanes aumentaban el número de nubes estratosféricas polares.

Para respaldar su hipótesis, señalaron que los niveles de ozono del hemisferio septentrional cayeron en un 10 por ciento a lo largo del año inmediato a la erupción de El Chichón, ocurrida en 1982. Los efectos de la erupción del Pinatubo pueden ser mucho peores en latitudes medias y altas.

Atendiendo a lo datos disponibles hasta la fecha, las advertencias de Solomon y Hofmann parecen pecar de prudencia. El volcán filipino ha inyectado en la atmósfera 20 millones de toneladas de dióxido de azufre, cifra que triplica la cantidad liberada por la erupción del Chichón. El Pinatubo ha creado una nube cuyo volumen parece igualar el de las nubes estratosféricas polares de los dos casquetes polares juntas.

Los datos más alarmantes proceden del Satélite de Investigación de la Atmósfera Superior, lanzando por la NASA en septiembre del año pasado, y que lleva a bordo un resonador de la banda de microondas (MLS). Este instrumento ha detectado niveles de ozono de los trópicos un 10 por ciento inferiores a cualquier medida anterior.

El MLS ha registrado el movimiento de lenguas de aire empobrecido en ozono desde los trópicos hacia el norte y hacia el sur, cuando el curso habitual es el opuesto: el aire procedente de latitudes altas y pobre en ozono avanza hacia las zonas tropicales. Ha detectado también grandes cantidades de monóxido de cloro, suficientes para eliminar cada día el uno por ciento de ozono, en una región que se extiende por todo el polo norte y por regiones del norte de Europa. La novedad del aparato medido y la provisionalidad de estos datos no merman la fuerza de la preocupante tendencia.

Por paradójico que resulte, se espera que la nube originada por el Pinatubo enfríe la temperatura del globo en los próximos años al impedir que la radiación solar infrarroja y visible llegue a la Tierra. Lo que no se espera que bloquee con semejante firmeza es la radiación ultravioleta para compensar los efectos de la caída de ozono.

La reducción del cloro estratosférico mitigaría los efectos destructores de ozono de los volcanes pero no resolvería el problema. Aun cuando se eliminaran todos los CFC y las fuentes de cloro existentes, seguirían aumentando los niveles de cloro estratosférico durante los próximos 20 o 30 años, tal es su prolongado tiempo de permanencia en la atmósfera sin degradarse. La próxima erupción, en otras palabras, destruiría aún más ozono de lo que ya el Pinatubo hoy es responsable.

El diente del monotrema

Hace 62 millones de años, Australia estaba unida a Sudamérica

El equipo dirigido por Rosendo Pascual, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, ha descubierto en la Patagonia un molar superior de un representante antiguo del grupo de los ornitorrincos. El hallazgo encierra doble interés: compensa la extrema rareza de fósiles de estos mamíferos y los instala más allá del continente australiano, donde se encuentran hoy confinados.

Viven tres grupos de mamíferos en la Tierra: Placentarios, Marsupiales y Monotremas. Los Placentarios y los Marsupiales, los más diversificados, son vivíparos, mientras que los Monotremas, más primitivos, ponen huevos como sus antepasados reptilianos. Se trata, sin embargo, de mamíferos auténticos: la madre amamanta a sus crías con leche que rezuma entre los pelos de su vientre. Tres especies de Monotremas subsisten actualmente en Australia y en Nueva Guinea (mientras que los Placentarios han colonizado todos los continentes y los Marsupiales florecen en Australia y las dos Américas).

Célebre por su pico de pato que le permite hozar en el fondo de ríos y lagos para encontrar su alimento, el ornitorrinco australiano (*Ornythorhynchus*) es el monotrema más conocido.



UN MOLAR FOSIL descubierto en la Patagonia demuestra que hace 62 millones de años América del Sur y Australia estaban todavía unidas por la Antártida.

Las otras dos especies son los equidnas, pequeños mamíferos insectívoros que se alimentan de hormigas y de termes y cuyo cuerpo está recubierto de púas, como el erizo europeo. El equidna de hocico corto (*Tachyglossus*) vive en Australia y en Nueva Guinea; el equidna de hocico largo (*Zaglossus*) sólo se halla presente en Nueva Guinea.

Las especializaciones notables, muy dispares, de ornitorrincos y equidnas abonan la antigüedad de la historia evolutiva de los Monotremas. Sigue siendo enigmática debido a la rareza de sus fósiles: hasta hace muy poco, el monotrema más antiguo conocido no se remontaba más allá del Mioceno medio de Australia (hace 15 millones de años) y sólo parecía antepasado del ornitorrinco; este *Obdurodon*, pariente próximo del ornitorrinco, se había desenterrado en Australia.

En 1985, Michael Archer y sus colaboradores, de la Universidad de Nueva Gales del Sur, hallaron un fragmento de la mandíbula de *Steropodon galmani*, una especie cercana a los ornitorrincos, en sedimentos australianos depositados hace 100 millones de años.

El descubrimiento de este *Steropodon*, uno de los mayores mamíferos conocidos que vivieron en la era Secundaria (sus dientes alcanzaban siete milímetros de longitud), confirma la antigüedad del grupo. Pero el hallazgo reciente en la Patagonia era inesperado: se trata de un molar, exhumado en niveles paleocenos depositados hace 62 millones de años, cuya forma característica, con crestas cortantes, paralelas, comparables a las de *Obdurodon* y a las de los ornitorrincos jóvenes (en los adultos los dientes son sustituidos por placas



EL ANIMAL más cercano al propietario del molar encontrado es Obdurodon*, un antepasado del ornitorrinco, que vivió hace 15 millones de años.*

córneas), indica que pertenecía a un monotrema.

Este parecido en fósiles tan antiguos atestigua, ante todo, una gran estabilidad en la dentición de los Monotremas: la evolución ha sido conservadora. Además, el nuevo fósil aporta una nueva luz a la historia biogeográfica de los Monotremas, al demostrar que ocuparon otros continentes además de Australia. Su presencia en América del Sur confirma, por si todavía era necesario, la teoría de la tectónica de placas, en la que se fundamentan las reconstrucciones paleogeográficas modernas.

Estas indican en especial la existencia, en el Jurásico (hace unos 135 millones de años), de dos antiguos supercontinentes: Laurasia, al norte, y Gondwana, al sur, separados por un gran paleoocéano, el Tetis. El Gondwana, de perfiles definidos tras el Jurásico, está en el origen de América del Sur, Africa, la Antártida, la India y Australia. En el Cretácico superior y en el Paleoceno, edad del monotrema patagónico, Africa y la India ya estaban separadas, pero América del Sur permanecía unida a Australia a través de la Antártida, cuyo clima era templado y húmedo, sin hielos eternos. Las faunas podían todavía propagarse de un continente al otro.

Basándose sobre todo en la distribución antigua de los grandes grupos de mamíferos, el paleontólogo Robert Hoffstetter ha supuesto la existencia de una gran guirnalda continental que habría conectado América del Sur, la Antártida y Australia, y donde los Marsupiales se habrían diversificado, lejos de la competencia de los Placentarios, cuyo bastión era Laurasia (y quizás Africa).

El descubrimiento patagónico apoya una de las bases de esta hipótesis. Es una nueva prueba paleontológica (si es que puede hablarse de pruebas en esta disciplina) de las vías de comunicación entre los continentes australes y del papel de estos continentes en el desarrollo y la diversificación de los Marsupiales y, hay que añadir ahora, de los Monotremas. ¿Cuándo se encontrarán los fósiles de Monotremas en la Antártida? (Emmanuel Gheerbrant, del CNRS-Universidad de París VI-VII)

Fuera de lugar

Planetas entre púlsares

Durante décadas los astrónomos han rastreado las estrellas de tipo solar en busca de sistemas planetarios. Empeño inútil hasta hoy. Pero el azar ha venido en su auxilio, de la mano de los púlsares, restos de explosiones de supernova formados por estrellas pequeñas y ultradensas y dotadas de una gran rotación interna.

El pasado mes de enero, Alexander Wolszczan, del Observatorio de Arecibo en Puerto Rico, y Dale A. Frail, del Observatorio Nacional de Radioastronomía, anunciaban la presencia de dos planetas, si no tres, girando en torno al púlsar PSR 1257+12, que se halla a unos 1500 años luz de la Tierra, en la constelación de Virgo. El púlsar había sido descubierto por Wolszczan en febrero de 1990.

El objeto, cuenta Wolszczan, se comportaba de una manera singular. A medida que los púlsares van girando, su potente campo magnético produce bruscas ráfagas de radiación que llegan a la Tierra, radioseñales que se distinguen por su notabilísima estabilidad. Ahora bien, las que proceden del púlsar en cuestión se adelantan unas veces y se atrasan otras, aunque manteniendo cierta pauta: las señales muestran dos ciclos superpuestos de 98,2 y 66,6 días terrestres.

Wolszczan interpretó esos datos explicando que el púlsar sufría una fuerza de arrastre hacia delante y hacia atrás por parte de dos objetos, invisibles y en órbita. Cuando el púlsar es desplazado en la dirección a la Tierra su radiación nos llega antes, ya que invierte un tiempo menor en recorrer el camino, y viceversa. Basándose en este débil movimiento de vaivén del púlsar (de unos 900 kilómetros), Wolszczan y Frail llegaron a la conclusión de que los objetos invisibles eran planetas cuya masa triplica la de la Tierra.

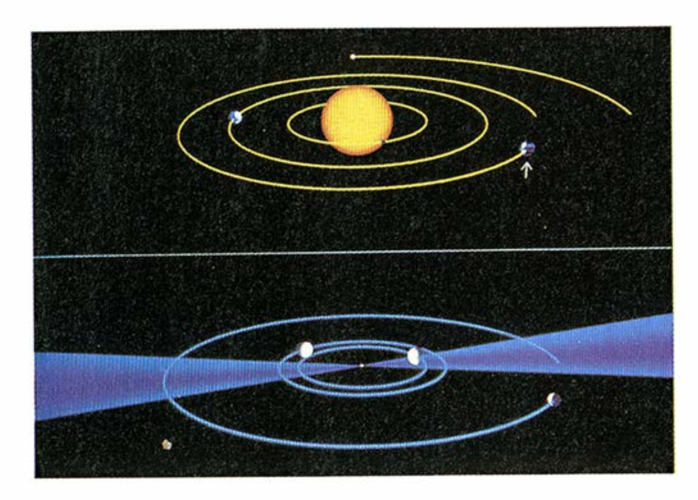
La historia de la búsqueda de planetas está repleta de supuestos hallazgos que resultaron falsos. Incluso en el entorno de los púlsares. En julio del año pasado, un equipo de radioastrónomos de la Universidad de Manchester anunció el descubrimiento de un planeta alrededor del púlsar PSR 1829-10; a comienzos del año en curso, sin embargo, se retractaban tras percibir el error cometido en la determinación de la posición del púlsar.

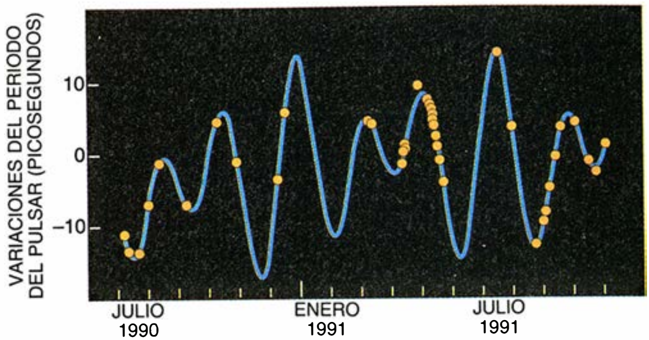
Lo de Wolszczan y Frail, por contra, va muy en serio. Será relativamente fácil determinar la existencia de los planetas en el púlsar ya que sus interacciones gravitatorias promueven un desplazamiento de la órbita, que se traduce, a su vez, en una variación mensurable de los tiempos de llegada de las señales del púlsar. A la confirmación de la hipótesis se van a consagrar los próximos meses.

Pero las conclusiones apoyadas en la medición de la atracción gravitatoria no lo explicarán todo. ¿Cómo han podido formarse planetas en órbita alrededor del púlsar? Muchos físicos teóricos respiraron con alivio cuando se retiró la hipótesis del planeta en torno a PSR 1829-10. La explosión de la supernova que transformó la estrella central en una estrella de neutrones debería haber destruido o difuminado cualquier planeta que hubiere; no era tampoco fácil justificar la aparición de un planeta en torno a PSR 1829-10. Este púlsar es joven (lo que significa que no hubo tiempo para la coalescencia planetaria) y gira lentamente (lo que implica que no se ha relacionado con ninguna otra estrella desde la explosión de la supernova).

El púlsar descubierto por Wolszczan es un objeto astronómico que gira con celeridad, una vuelta cada 6,2 milisegundos, o 162 veces por segundo. Y se admite que los púlsares maduros han podido extraer materia de acompañantes estelares cercanos, con el consecuente aumento de velocidad; el gas restante se condensaría hasta constituir planetas.

PSR 1257+12, al igual que muchos púlsares que giran aceleradísimos, se desenvuelve sin ningún compañero estelar. Para muchos teóricos, la energía electromagnética y las partículas emitidas por el púlsar podrían





PLANETAS EN ORBITA alrededor de un púlsar y su distribución similar a la conocida de los planetas del sistema solar interno. La existencia de planetas en torno a un púlsar se infiere de las variaciones en sus radioemisiones (arriba).

haber calentado su compañera, mayor y más joven, hasta volatilizarla; a mayor abundamiento, se acaban de observar dos púlsares procediendo en ese sentido. Las simulaciones llevadas a cabo en el supercomputador del laboratorio Lawrence en Livermore han mostrado que una parte del gas resultante puede condensarse en disco estable alrededor del púlsar y convertirse en fuente de aprovisionamiento para el planeta embrionario. La coalescencia de los restos de la estrella compañera podría originar también un planeta.

Parece evidente que algunos púlsares interaccionan con estrellas que giran en su vecindad. Nadie sabe con certeza si estas interacciones crearán planetas. Pero si los hubiera en torno a PSR 1257+12, la presencia de planetas alrededor de los púlsares constituiría un fenómeno bastante común, mucho más de lo imaginado hasta hoy.

De cerca

Fotos y texto: Satoshi Kuribayashi

Con la rapidez del rayo

La animosidad contra los anfibios ha persistido durante siglos. Todavía en la última centuria, el manual de zoología escrito por Milne Edwards, que gozó de cierta difusión en las universidades europeas, terminaba así el punto referente a los sapos, vertido en su edición española de 1843: "...a la verdad hai pocos animales más asquerosos y repugnantes". Cualquier libro que hable hoy de esos anuros resaltará, por contra, su labor benéfica para la agricultura, por la gran cantidad de insectos nocivos que retira de la circulación.

Los sapos se caracterizan por su cuerpo rechoncho, tamaño variable, extremidades cortas y piel reseca y verrugosa. Detrás de la cabeza poseen un par de glándulas parótidas prominentes, que segregan sustancias tóxicas diversas, de aminas biogénicas a ésteres. Ese veneno, que liberan cuando se les acosa o molesta, suele irritar los ojos y las membranas mucosas del agresor.

Prefieren los terrenos húmedos y se muestran activos cuando cae el crepúsculo y la noche. Pasan, sin embargo, el día escondidos debajo de las piedras o troncos. De costumbres solitarias por lo común, sólo se agrupan cuando llega la época de celo.

Se alimentan de muchas clases de insectos, pero también de otros artrópodos, como quilópodos, diplópodos e incluso arácnidos, sin hacerles ascos a otros invertebrados cuando el hambre aprieta. El sapo que hay en mi jardín dispone de la presencia de una colmena, de cuyos moradores se nutre a placer. Y caza sus presas de una manera espectacular, con un movimiento rapidísimo de su lengua protráctil, ayudándose en el movimiento de sus mandíbulas y de sus patas posteriores. La presa incauta queda adherida al mucus que tapiza la punta de su arma. Para captar ese instante, me he valido del sensor de infrarrojos, retrasando el tiempo de disparo.





Foto de la derecha
distancia focal: 100 mm
diafragma: F = 22
exposición: 1/6000 de segundo. Flash electrónico
película: ISO = 100



Superantígenos en la enfermedad humana

Causantes del choque tóxico y de la intoxicación alimentaria, estas proteínas intervienen en el desarrollo de la artritis y del SIDA. Se comienza a conocer su papel en la estimulación del sistema inmunitario y en la enfermedad

Howard M. Johnson, Jeffry K. Russell y Carol H. Pontzer

Cuando el sistema inmunitario de una persona se encuentra con una proteína procedente de un virus o de una bacteria, entran en acción los linfocitos *T*, una variedad de los leucocitos. Sin embargo, sólo lo hace una fracción muy reducida de ellos, uno de cada más de 10.000. Aunque constituyan un número limitado, estas células orquestan un ataque específico contra la proteína extraña, el antígeno, destruyendo al invasor sin dañar al tejido sano. Frente a esa situación de normalidad, las proteínas llamadas superantígenos subvierten el sistema inmunitario, conduciéndolo a una locura improductiva, e incluso destructora.

Estas sustancias tan asombrosas pueden llegar a despertar hasta una de cada cinco células *T*, la mayoría de las cuales son inútiles para la lucha contra la infección. Y lo que es peor, algunas de estas células activadas pueden desencadenar un ataque autoinmunitario y dañar al mismo organismo que debían proteger. Se comportan como fieras acorraladas que se rebelan contra su dueño. A veces, los superantígenos pueden tener el efecto opuesto: provocan la muerte de las células que excitan y, con ello, horadan el escudo defensivo del organismo.

La investigación ha identificado ya los pasos mediante los cuales los superantígenos estimulan las células *T* en proporciones excesivas. Esa línea de trabajo está explicando algún que otro misterio de la medicina, entre ellos el modo de actuar de ciertas toxinas responsables de los síntomas de la intoxicación alimentaria y del síndrome del choque tóxico. Al mismo tiempo, está abriendo vías nuevas que permitirán conocer las causas y los posibles tratamientos de diversas enfermedades, incluidas la artritis, el SIDA y el cáncer. Existen razones para esperar que las propiedades inmunoestimuladoras e inmunodepresoras de los superantígenos se reconduzcan hasta convertirlos en eficaces instrumentos terapéuticos.

HOWARD M. JOHNSON, JEFFRY K. RUSSELL y CAROL H. PONTZER pertenecen a la Universidad de Florida en Gainesville. Johnson es profesor de investigación en el departamento de microbiología y de citología. Russell es colaborador de investigación y Pontzer goza de un contrato de investigación posdoctoral en el mismo departamento.

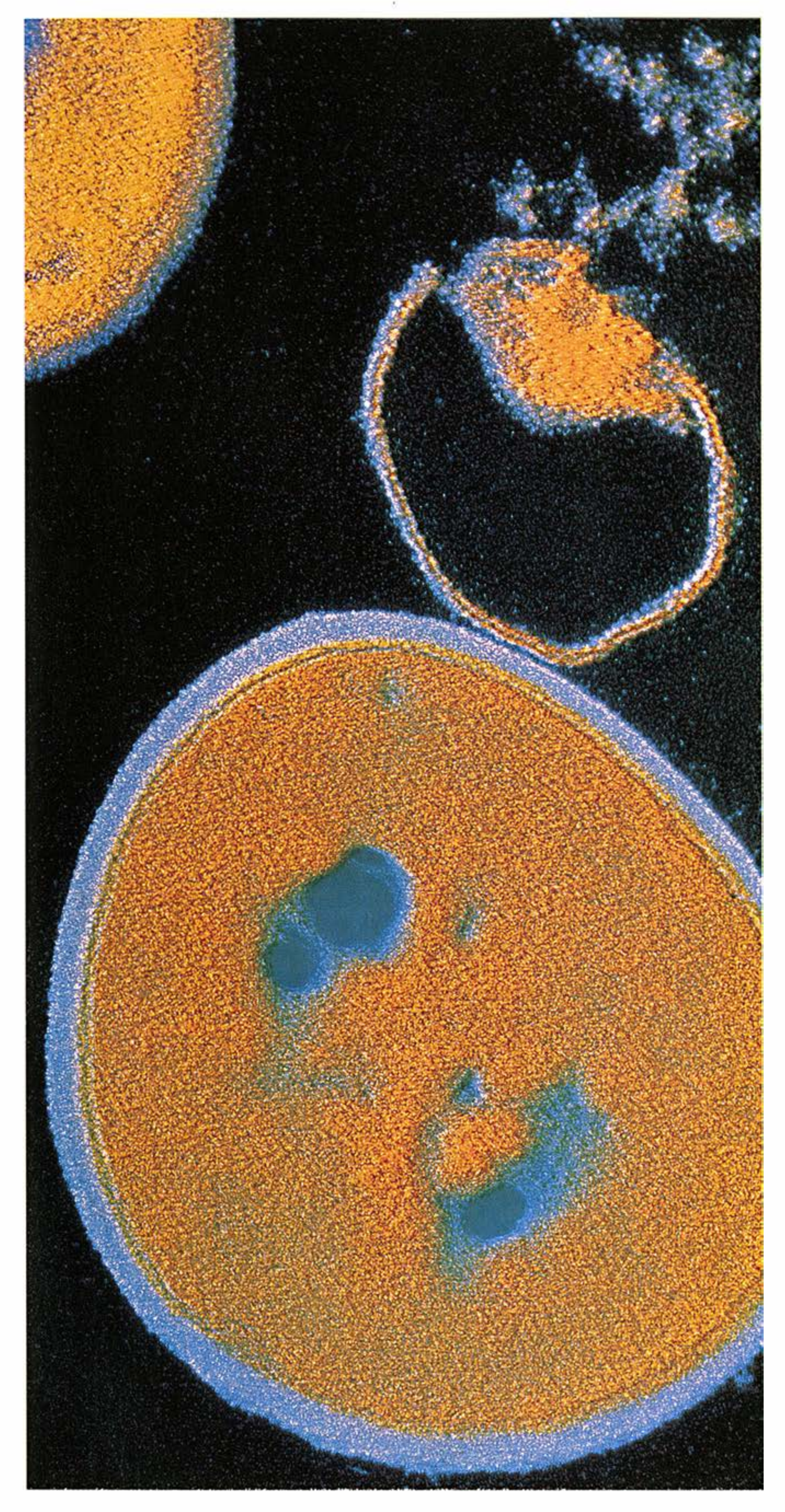
Es mucho lo descubierto en el ámbito de los superantígenos mediante el estudio de los primeros ejemplos conocidos: las enterotoxinas estafilocócicas, grupo de proteínas que poseen una estructura afín. Uno de nosotros (Johnson) participó en los trabajos que en los años setenta revelaron la naturaleza superantigénica de las enterotoxinas, por más que el término superantígeno no se acuñase hasta muchos años después.

Johnson y sus colaboradores de la Universidad de Texas en su Sección Médica de Galveston descubrieron la extraordinaria potencia de estas proteínas mientras abordaban la forma en que las toxinas, causa de hasta un 45 por ciento de las intoxicaciones alimentarias, provocaban la enfermedad. Ya en 1970 sabíase que, cuando la bacteria *Staphylococcus aureus* coloniza el alimento, segrega una o más enterotoxinas, denominadas ahora A, B, C, D y E. Unas horas después de la ingestión de alimentos contaminados, cargados de toxinas, hace su aparición una serie de síntomas, sensación de debilidad, fiebre, náuseas, vómitos y diarrea. Los médicos sabían también que esos síntomas empezaban a ceder al cabo de uno o dos días porque las enzimas intestinales degradaban las toxinas en ese intervalo. Pero no abundaban las pistas sobre el mecanismo en cuya virtud las enterotoxinas desencadenaban ese malestar.

Habíase advertido ya que el tejido intestinal de los pacientes afectados presentaba un aspecto normal al examinarlo con el microscopio. Aparentemente, las proteínas no producían daño alguno en el lugar que, en pura lógica, tendría que ser objetivo de un invasor intestinal: las células especiales que regulan el paso de los nutrientes y del agua entre el tubo intestinal y la sangre. La única anormalidad observable era la presencia de leucocitos en el tejido. Una infiltración de ese tipo es la respuesta esperada ante cualquier infección, y por ello no había razón para pensar que las células estuvieran haciendo algo inadecuado.

Sin embargo, no tardó en verse que había razones para sospechar de un proceder dañino por parte de esas células. En 1970, Duane L. Peavy y sus colaboradores, de la Universidad de Florida en Gainesville, observaron que la introducción de la enterotoxina B en la sangre provocaba una proliferación de los linfocitos. Cinco años después, Johnson y sus colaboradores en la sección de la FDA (ente norteamericano para asuntos de nutrición y medicamentos) en Cincinnati demostraron que los linfocitos eran células *T*, y llegaron a la conclusión de que también la toxina A estimulaba el crecimiento de dichas células.

Movido por la curiosidad de saber por qué las enterotoxinas provocaban con tanta facilidad la replicación de las células *T*, Johnson inició una se-



1. CELULAS BACTERIANAS (*esferas*) de *Staphylococcus aureus*. Las cepas de *S. aureus* causan la intoxicación alimentaria y el síndrome del choque tóxico al liberar superantígenos, que activan en proporciones elevadas los linfocitos *T* auxiliares, células del sistema inmunitario. La célula que aparece arriba a la derecha se halla en un proceso destructivo por haber sufrido el ataque de un antibiótico.

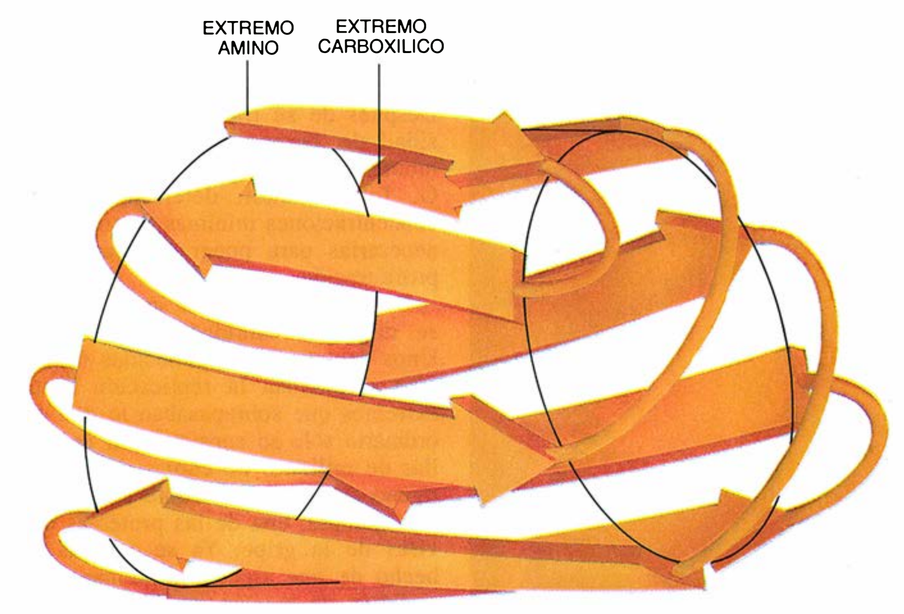
rie de ensayos que acabaron revelando el profundo efecto de esas proteínas sobre el sistema inmunitario. Después de su traslado a la Universidad de Texas, Johnson y sus colaboradores Marlyn P. Langford y G. John Stanton determinaron las concentraciones mínimas de toxina A necesarias para poner en marcha la proliferación.

Descubrieron, no sin sorpresa, que se requerían cantidades minúsculas. Unos centenares de moléculas de toxina disparaban la replicación hasta extremos que sobrepasaban lo que de ordinario sólo se consigue con un millar de millones de copias de un antígeno convencional, como puede ser, por ejemplo, una de las proteínas del virus de la gripe. Ya se conocía el hecho de que algunas proteínas estimulaban de manera prodigiosa a los linfocitos, pero ninguna poseía la potencia de la enterotoxina.

Una pequeña cantidad de toxina A daba lugar también a una producción extraordinariamente elevada de interferón gamma, una de las diversas citocinas, o mensajeros químicos, fabricadas por el subgrupo de linfocitos *T*, conocidos con el nombre de células auxiliares (y, también, coadyuvantes). Estas células dirigen en buena parte la respuesta inmunitaria. No atacan a las bacterias por sí mismas, sino que se valen de las citocinas para activar tanto a los linfocitos *T* citotóxicos, como a los linfocitos *B*, que segregan anticuerpos contra los antígenos. Los datos sobre el interferón indicaban que las células auxiliares se encontraban entre los blancos de las enterotoxinas estafilocócicas.

Cabía entonces preguntarse: ¿De qué modo una actividad masiva de las células auxiliares puede desencadenar el profundo malestar subsiguiente a una intoxicación alimentaria? Una primera pista la ofreció Kendall A. Smith, de la Facultad de Medicina de Dartmouth, cuyos intereses iban por otros derroteros.

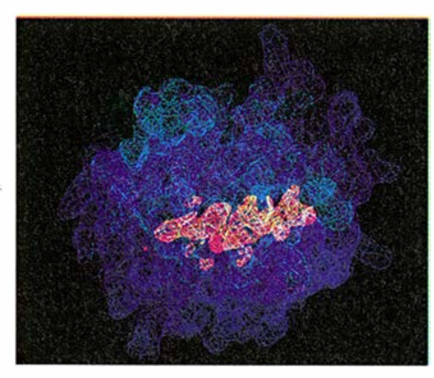
En su investigación sobre el mecanismo que emplean los antígenos normales para instar la replicación de las células *T*, Smith determinó que las células *T* auxiliares debían producir interleucina-2, otra citocina, en respuesta a los antígenos [véase "Interleucina-2", por Kendall A. Smith; INVESTIGACION Y CIENCIA, mayo de 1990]. Este descubrimiento sugirió a Johnson que la interlucina-2 sería también un probable mediador del efecto de los superantígenos sobre las células *T*. Quedaba abierta, sin embargo, la posibilidad



2. FORMA CILINDRICA, común a varias proteínas y posible también en las enterotoxinas del *S. aureus*, responsables de la intoxicación alimentaria. Las flechas representan estructuras beta, áreas en las cuales la proteína está extendida, en lugar de enroscada en forma de hélice alfa. Las enterotoxinas incluyen unas cuantas hélices, pero su localización precisa en la estructura tridimensional está aún por determinar. El predominio de estructuras beta sugiere que una gran parte de la proteína se halla expuesta a su entorno, en disposición de interaccionar con otras moléculas.

de que las toxinas activasen las células *T* por otros medios.

En 1985, el equipo de Roland Carlsson, de la Universidad de Lund, respaldó el papel central de la interlucina-2. Demostró que, cuando una pequeñísima cantidad de enterotoxina A se mezclaba con linfocitos *T*, el conjunto de estas células producía una enorme cantidad de la citocina. Años después, Johnson y uno de sus alumnos, Harold I. Magazine, confirmaron que la interlucina-2 era el mediador de la multiplicación de las células *T* inducida por la enterotoxina; las toxinas no se saltaban la vía de la interlucina.



3. PEPTIDO (*rosa*) atrapado en la hendidura de ligamiento, a modo de salchicha incrustada en el panecillo. La imagen, obtenida por Don C. Wiley y sus colaboradores en la Universidad de Harvard, se basa en una molécula de CMH de clase I, que probablemente será parecida a las moléculas del CMH de clase II.

Casi simultáneamente, Steven A. Rosenberg, del Instituto Nacional de la Salud, observó que la infusión de dosis elevadas de interlucina-2 en la circulación de pacientes cancerosos (como parte de un tratamiento experimental) producía efectos colaterales desagradables: fiebre, malestar, nauseas, vómitos y diarrea, es decir, los mismos síntomas que se presentan en las víctimas de una intoxicación alimentaria.

Estos datos de índole diversa evidenciaban que las enterotoxinas provocaban esa sintomatología al estimular la produción de interlucina-2 hasta niveles elevados. El hecho de que la infusión de esta citocina provocara la sintomatología familiar de la intoxicación alimentaria constituía un apoyo más en el sentido de que no era a través de una acción local como el exceso de interlucina-2 producía sus efectos desagradables. Por el contrario, se abre paso hacia la circulación, y envía señales desde allí, o viaja por la sangre hasta llegar a los centros cerebrales provocando náuseas, fiebre y malestar gástrico.

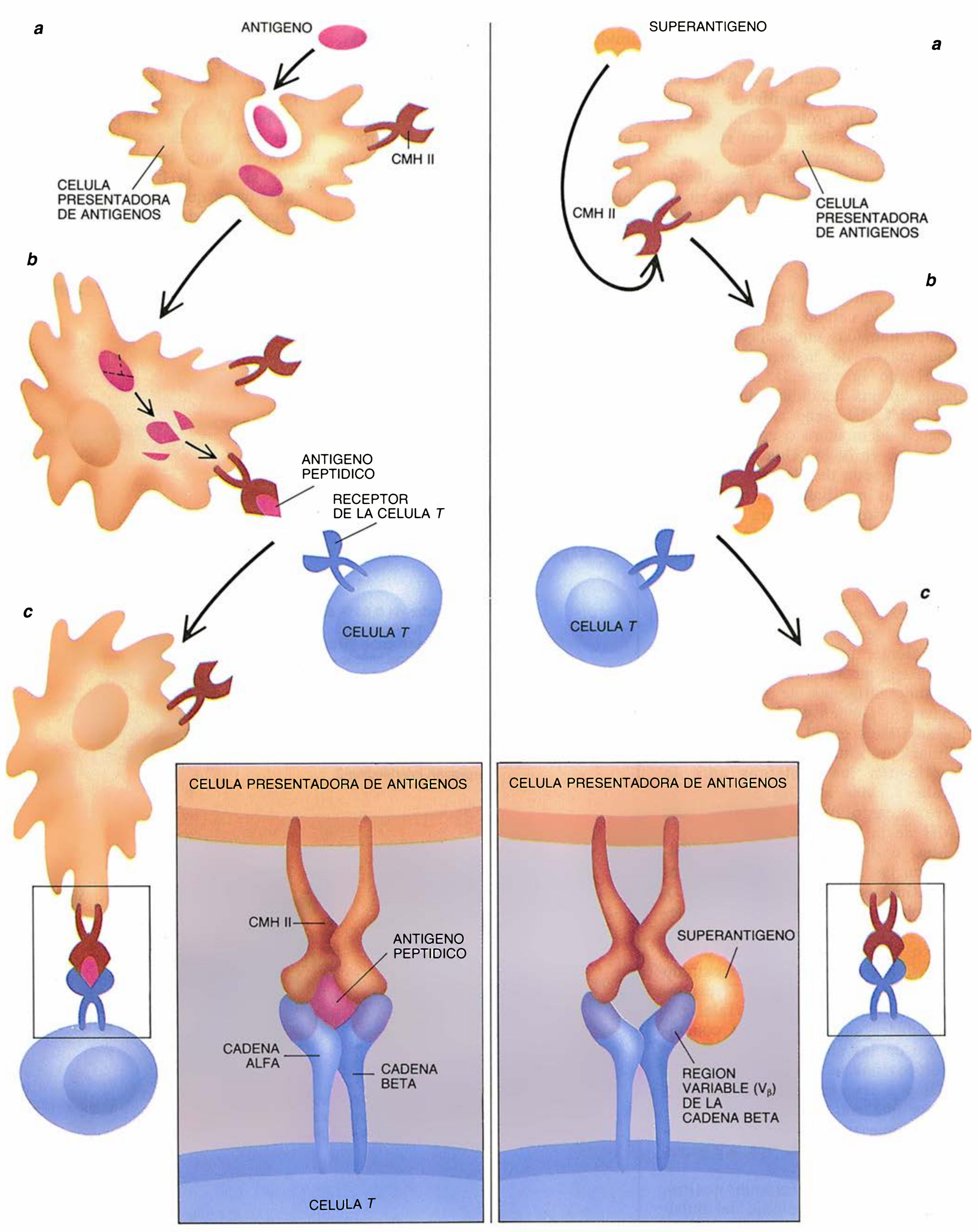
En la misma línea de razonamiento cabía pensar que el exceso de interlucina-2 originase también los síntomas del síndrome del choque tóxico. El superantígeno responsable de esta alteración se produce por una cepa de *S. aureus* y es estructuralmente semejante a las enterotoxinas de *S. aureus*. Los pacientes afectados por el choque tóxico presentan inicialmente los síntomas de una intoxicación alimentaria, pero sufren luego un enlentecimiento peligroso de la circulación. Probablemente la enfermedad se torna más grave, porque, a diferencia de lo que ocurre con las bacterias causantes de la intoxicación alimentaria, la cepa que da origen al choque tóxico se reproduce en el interior del organismo. Los pacientes quedarían por ello expuestos a concentraciones más elevadas de toxina y consiguientemente también a niveles más altos o más prolongados de interlucina-2.

En 1988, se creía que la estimulación de muchos millones de células *T*, promotoras de la fabricación desmesurada de interlucina-2, era el nexo entre las enterotoxinas y los síntomas de la intoxicación alimentaria. Los datos acumulados, sin embargo, no conseguían explicar cómo las enterotoxinas actúan sobre el "interruptor" que activa tantas células *T*. Los trabajos recientes comienzan ya a arrojar cierta luz.

El análisis estructural es el primer paso a dar, cuando abordamos el mecanismo por el que una determinada molécula establece comunicación con células del organismo. Por esa misma razón, buena parte de las investigaciones recientes se basan en los estudios pioneros de Merlin S. Bergdoll. Con su equipo de la Universidad de Wisconsin, Bergdoll determinó la secuencia de los aminoácidos de la enterotoxina B en 1970. A partir de entonces, su grupo y también el de otros han establecido las secuencias de todas las enterotoxinas y también la de la toxina responsable del síndrome del choque tóxico.

Los análisis han puesto de manifiesto que esas sustancias tóxicas son todas proteínas de tamaño medio y ricas en aminoácidos hidrofílicos. Cada molécula está constituida fundamentalmente por estructuras beta (conformaciones en las que el polipéptido se halla extendido, no plegado sobre sí mismo), aunque las proteínas incluyan también unas cuantas hélices alfa (conformaciones en las que el esqueleto de la proteína adopta la forma de un muelle apretado) [véase "Plegamiento de las proteínas", por Frederic M. Richards; INVESTIGACION Y CIENCIA, marzo de 1991]. En otras palabras, las enterotoxinas adoptan una disposición de relativa soltura; una buena parte de su superficie queda expuesta al medio acuoso del organismo, permitiendo así su interacción con otras moléculas.

Carlsson, Bernhard Fleischer y Hubert Schrezenmeier, los dos últimos en la Universidad de Ulm, aportaron nuevas pistas sobre la activación de



4. EL LIGAMIENTO A LAS CELULAS *T* se realiza de manera diferente por los antígenos convencionales y los superantígenos. En el caso de los antígenos convencionales (*lado izquierdo*), las células presentadoras de antígenos (*a*) deben engullirlos primero, cortarlos y ofrecerlos como péptidos en la hendidura de ligamiento con las moléculas del CMH de la clase II (*b*). Los antígenos atraen entonces a las células *T* portadoras de receptores específicos para los antígenos (*c*). Ambas cadenas alfa y beta de los receptores entran en contacto con el antígeno (*recuadro detallado*). Los superantígenos se unen directamente a la cara externa de las moléculas de CMH (*lado derecho, a* y *b*) y posteriormente a la cara externa de los receptores de las células *T* (*c*), adhiriéndose a una zona de la cadena beta de estructura variable (*recuadro detallado*). La unión a la región variable (V_β) explica el efecto tan potente de los superantígenos sobre las células *T*.

las células T por los antígenos, al mostrar que las toxinas se comportan como antígenos convencionales en ciertos aspectos, aunque presentan diferencias críticas en otros. Antes de que las células T auxiliares puedan reconocer a las proteínas antigénicas convencionales, éstas deben sufrir un procesamiento previo a cargo de macrófagos u otras células presentadoras de antígenos. Estas células engullen los antígenos y los cortan hasta convertirlos en péptidos, es decir, cadenas pequeñas de aminoácidos. Las células presentadoras despliegan entonces los antígenos peptídicos sobre la superficie celular en combinación con las llamadas moléculas del complejo mayor de histocompatibilidad (CMH) de la clase II. Un péptido encaja en una hendidura de la molécula del CMH como una piedra preciosa en su montura o como una salchicha en el bollo. Una vez que el antígeno queda desplegado, las escasas células auxiliares del organismo que lleven receptores para ese péptido particular se enlazan con él. (Cada célula T es específica de un tipo de antígeno peptídico.)

En 1988 los grupos sueco y alemán demostraron, de forma independiente, que, al igual que sucede con la enorme variedad de antígenos, los superantígenos de las enterotoxinas sólo pueden excitar a las células auxiliares en el caso de que las células presentadoras de antígenos desplieguen las proteínas ante la célula T. Más aún, la presentación corre a cargo de las moléculas del CMH de la clase II.

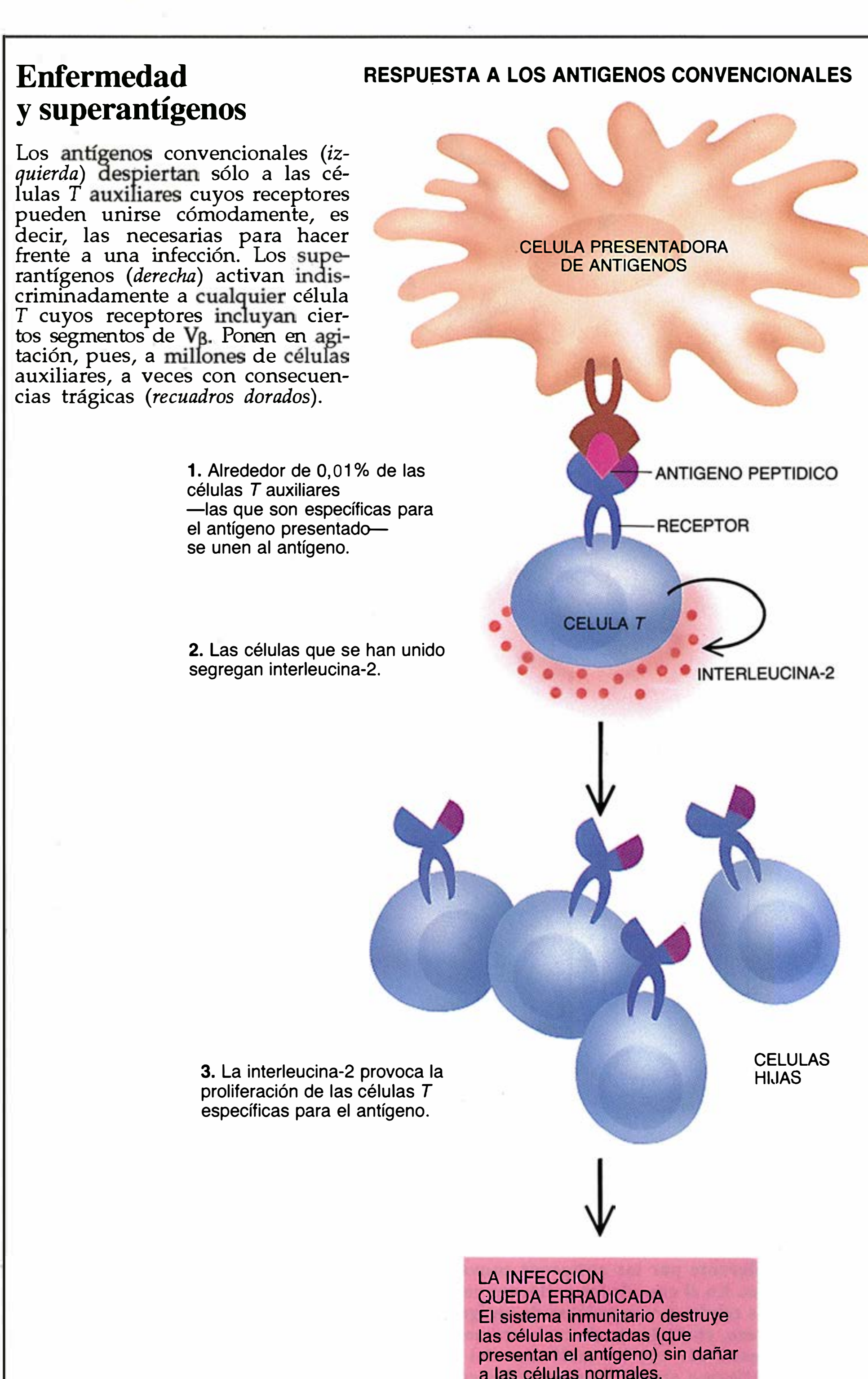
Mas, a diferencia de lo que ocurría con los antígenos típicos, las enterotoxinas se unían directamente a las moléculas de CMH; no se requería la captación previa y el procesamiento ulterior en el interior de las células. Ese comportamiento extraño significaba que las células T respondían a las toxinas intactas. Tales peculiaridades sugerían que el conocimiento de los sitios de unión de las enterotoxinas a las moléculas de CMH y a las células T podría revelar por qué son muchas más las células T que reaccionan ante los superantígenos que ante los antígenos convencionales.

Hoy sabemos que las enterotoxinas evitan la superficie interna del bolsillo o hendidura que la molécula del CMH utiliza para el reconocimiento del péptido, para engarzarse en su superficie exterior. La unidad superantígeno-CMH establece contacto con el receptor de la célula T en un lugar distinto al de la superficie que envuelve a los antígenos convencionales. Para ser más preciso, los receptores de las células T están constituidos por dos cadenas proteínicas, alfa y beta. Ambas cadenas incluyen regiones estructuralmente variables e invariables, que participan en la unión con los antígenos peptídicos convencionales. Se piensa que las enterotoxinas se unen a la región variable de la cadena beta —o V-beta (V_β)—, en una zona no implicada en el ligamiento de los antígenos típicos.

Se ha comprobado también que cada enterotoxina atrae a un tipo particular de V_β. Por ejemplo, los tipos correspondientes a los números que van del 5 al 12 podrían reconocer una enterotoxina, mientras que los tipos 12, 15 y 18 podrían reconocer otra. No llegan a 30 los tipos de V_β estimados en el organismo humano, si bien la fracción de células T auxiliares que llevan un tipo determinado puede diferir de una per-

Enfermedad y superantígenos

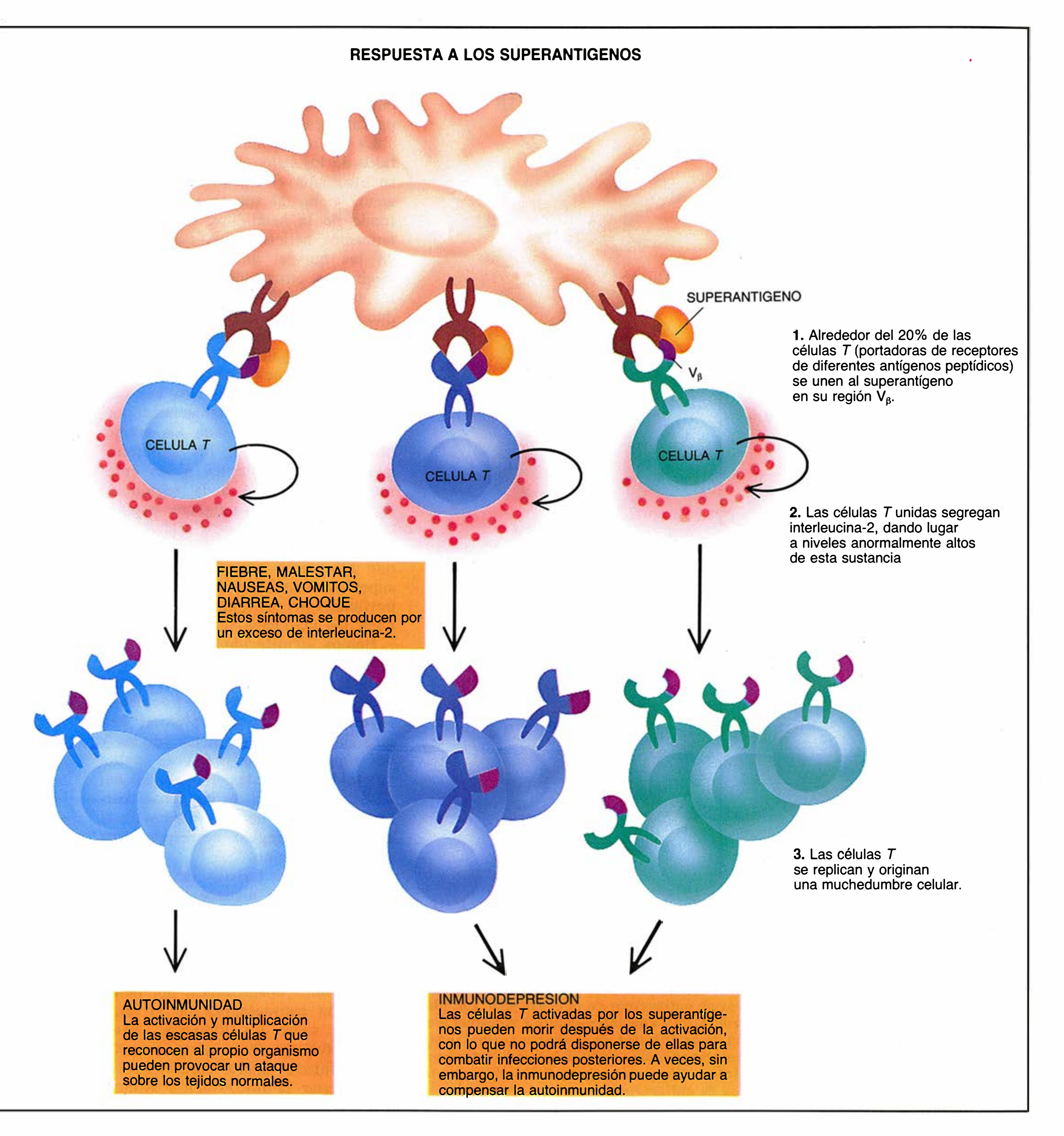
Los antígenos convencionales (*izquierda*) despiertan sólo a las células T auxiliares cuyos receptores pueden unirse cómodamente, es decir, las necesarias para hacer frente a una infección. Los superantígenos (*derecha*) activan indiscriminadamente a cualquier célula T cuyos receptores incluyan ciertos segmentos de V_β. Ponen en agitación, pues, a millones de células auxiliares, a veces con consecuencias trágicas (*recuadros dorados*).



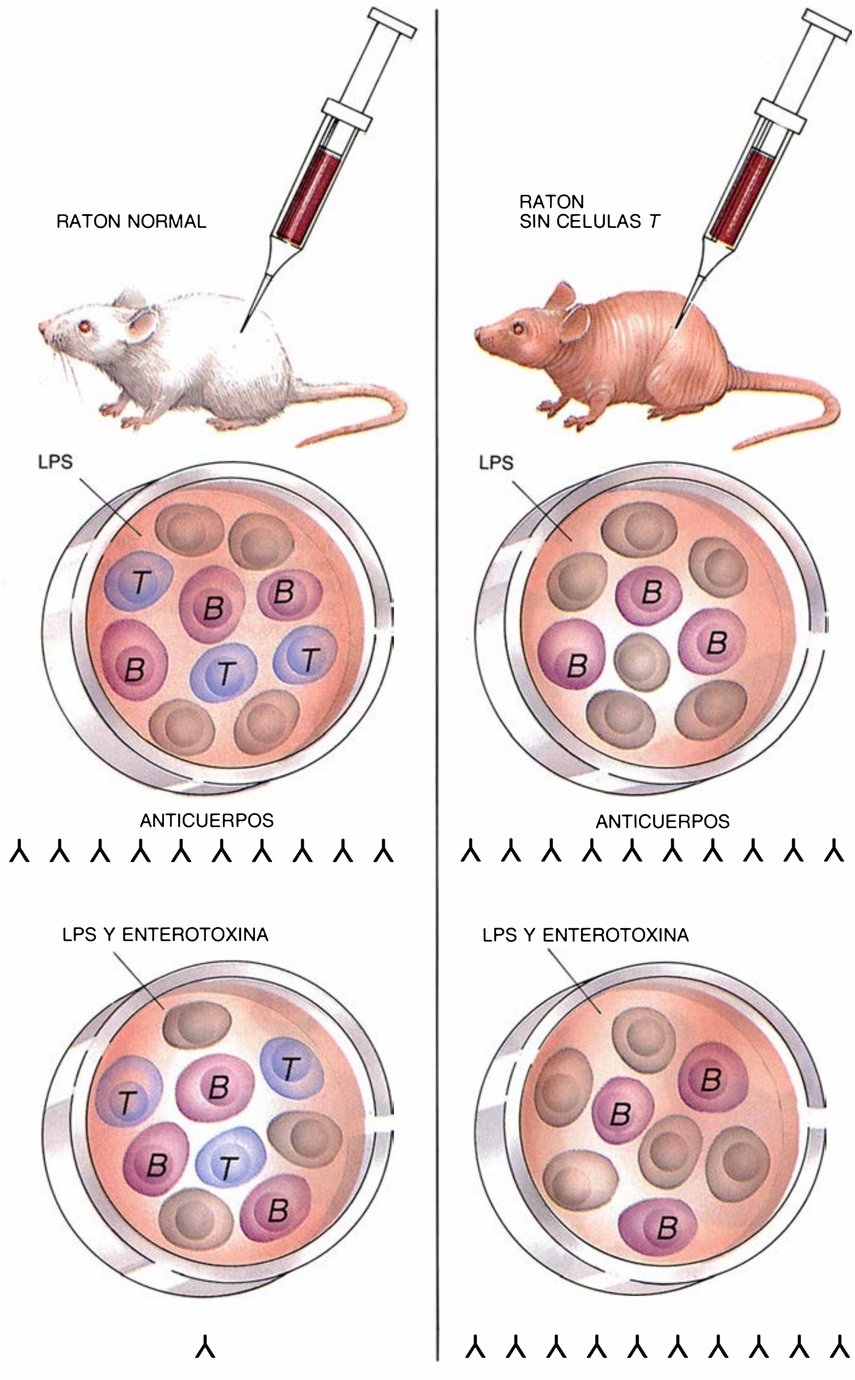
sona a otra. Por ello un antígeno convencional puede activar sólo el escaso número de células auxiliares específicas para ese antígeno. Una determinada enterotoxina, sin embargo, puede activar un número muy elevado de células auxiliares (representantes de una enorme variedad de especificidades ante antígenos peptídicos) por el hecho de que esas células *T* porten un tipo particular de V_{β}.

Este cuadro tan acabado, que costó mucho encajar, testimonia el tesón de varios grupos investigadores. Igual que otros, centramos nuestra atención en el ligamiento, que se desviaba de lo que se reputaba normal, a la molécula del CMH de la clase II. Por su lado, Philippa Marrack y John Kappler, del Centro Nacional Judío de Neumología e Inmunología de Denver, y el grupo de Charles A. Janeway, Jr., de la Universidad de Yale, encabezaron buena parte de la investigación inicial sobre la interacción de los superantígenos y las células *T*.

Don C. Wiley, de la Universidad de Harvard, nos allanó el camino de la interacción entre enterotoxinas y las moléculas del CMH de clase II, cuando con su equipo dilucidó la estructura tridimensional de las moléculas del CMH de clase II. De igual manera que sucede con el re-



ceptor de las células *T*, las células organizan las moléculas del CMH de la clase II a partir de la conjunción de dos cadenas proteínicas, alfa y beta. La región que forma la hendidura de ligamiento para los antígenos convencionales está formada por una hélice que pertenece a la cadena alfa (en una cara de la hendidura), una hélice que aporta la cadena beta (la otra cara de la hendidura) y una zona conectora no helicoidal en el fondo de la hendidura (donde coinciden ambas caras), constituida por segmentos que pertenecen a ambas cadenas.



5. EXPERIMENTOS CON RATONES sugieren que los superantígenos pueden alterar la inmunidad al activar células *T* supresoras. Cuando se añadió LPS, un antígeno convencional, a la sangre de ratones normales (*arriba a la izquierda*), y a la de otros que carecen de células *T* (*arriba a la derecha*), ocurrió lo que se esperaba: el LPS estimuló a los linfocitos *B*, los productores de anticuerpos en el organismo, con liberación de anticuerpos anti-LPS. Tras añadir LPS y una enterotoxina a muestras frescas, la enterotoxina inhibió la producción de anticuerpos en la sangre normal (*abajo a la izquierda*), pero no en las muestras que carecían de células *T* (*abajo a la derecha*). Dado que las dos muestras de sangre diferían sólo en las células *T*, inferíase que las células *T* habían suprimido la producción de anticuerpos.

Para identificar el lugar donde las enterotoxinas podrían ligarse a la mólecula del CMH, nos valimos de cierto hallazgo de otros: el péptido dotado de una estructura bien definida en el interior de una proteína de mucho mayor tamaño adoptará generalmente la misma estructura, u otra semejante, si se sintetiza en cuanto péptido. Una vez conseguidos los tres componentes principales de la región donde se liga el antígeno a la molécula del CMH, observamos que al exponerlos por separado a la enterotoxina A se hacía patente un patrón bien definido.

La toxina se unía sólo a los péptidos de los lados del dominio donde se efectuaba el ligamiento del antígeno, y no al que corresponde al fondo de la hendidura. Cuando sintetizamos hélices de la cadena beta en las que el aminoácido alanina sustituía a otros aminoácidos naturales en lugares seleccionados, vimos que sólo las sustituciones operadas sobre una superficie situada fuera de la zona de ligamiento de los antígenos convencionales relajaban el ligamiento de la toxina A. Una vez reunidos estos datos, establecimos que, al igual que sucede con los antígenos convencionales, los superantígenos correspondientes a las enterotoxinas se unen a la región de ligamiento de los antígenos peptídicos en la molécula de CMH de clase II, aunque también quedaba claro que esa unión tiene lugar sobre la superficie externa, y no sobre la superficie interna, que es donde se unen los antígenos típicos.

Hemos identificado también varios segmentos de la enterotoxina A que interaccionan con moléculas del CMH. Confirmamos esto mezclando segmentos de la enterotoxina con moléculas del CMH en las células y descubriendo qué pieza se había combinado con las moléculas del CMH. La mayoría de las zonas reactivas procedían de un extremo de la enterotoxina, región correspondiente al extremo amino.

Durante ese trabajo descubrimos algo de posible alcance terapéutico. Vimos que los péptidos del extremo terminal amino se trababan con tal facilidad al CMH, que impedían el ligamiento de la enterotoxina intacta. Los péptidos obstaculizan, por tanto, la acción estimuladora de la enterotoxina sobre los linfocitos. Estos fragmentos reactivos podrían servir en el futuro como medicamentos para aliviar la intoxicación alimen-

taria, el choque tóxico y otras alteraciones.

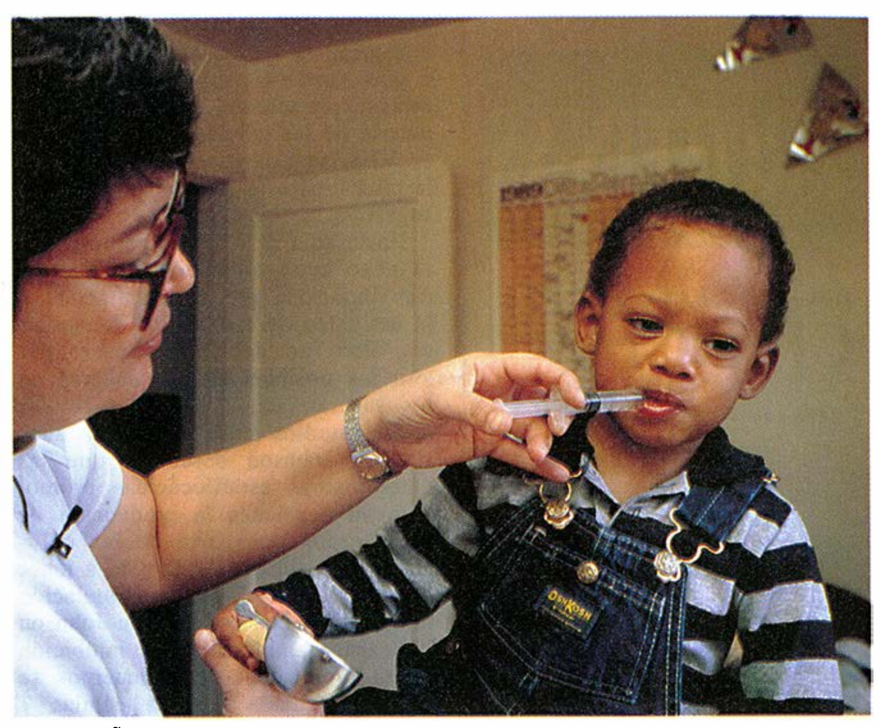
El trabajo correspondiente a la segunda parte de estas investigaciones, la interacción de los superantígenos con las células *T*, adquirió una importancia especial en 1989. En ese mismo año, dos grupos diferentes llegaron a la conclusión de que las enterotoxinas unidas al CMH activaban las células *T* enlazándose simplemente en la región V_β del receptor de la célula *T*. Nos referimos al equipo de Marrack y Kappler, en Colorado, y al de Janeway, en Yale, junto con Steve Buxser, de la empresa Upjohn.

El grupo de Marrack y Kappler propuso entonces el término "superantígeno" para describir este tipo de moléculas, vocablo que designa a la proteína que activa muchos clones de células *T* diferentes (cada uno con su propia especificidad para un antígeno peptídico) al unirse a estructuras V_β determinadas.

A partir de entonces, Nicholas R. J. Gascoigne y Kristina T. Ames, de la Clínica Scripps en La Jolla, obtuvieron los primeros datos que indicaban que los superantígenos debían unirse a las moléculas de CMH para ligarse a la zona V_β del receptor de una célula *T*. Sólo cuando la enterotoxina A estaba ya asociada a una molécula del CMH de la clase II, podía unirse a un segmento V_β determinado de una cadena beta obtenida por síntesis. El superantígeno libre no podía por sí mismo unirse a la cadena. La unión a la molécula de CMH puede cambiar la forma de las enterotoxinas en el sentido de dejar que el sitio responsable del ligamiento con la V_β resulte accesible a las células *T*, o que esa unión aumente la afinidad del sitio por la región V_β.

Crecen las pruebas que respaldan la hipótesis según la cual los superantígenos microbianos, incluidas las proteínas sintetizadas por bacterias estreptocócicas y micoplasmas, estimulan las células *T* a semejanza del comportamiento de las enterotoxinas, es decir, se anclan en determinados tipos de V_β. Remedan esa misma conducta los antígenos menores estimuladores de linfocitos (Mls), presentes en los ratones.

En un primer momento se pensó que las proteínas Mls eran propias de los roedores; se les supuso autosuperantígenos. Hoy se sabe, sin embargo, que los antígenos Mls derivan del virus del tumor mamario del ratón (VTMR). Se trata de un retrovirus que insiere sus genes en el ADN del ratón, para que éste sintetice los antígenos Mls como si fuesen proteínas propias.



6. UN NIÑO CON SIDA recibe AZT de manos de su madre adoptiva. Hay pruebas de que uno o más superantígenos en el virus del SIDA puedan contribuir a la depleción letal de las células *T* auxiliares en los individuos infectados.

Algunos de estos u otros superantígenos podrían contribuir al desarrollo de enfermedades autoinmunitarias, en las que los componentes del sistema inmune atacan al tejido normal. Después de todo, no parece impensable que la estimulación de un 20 por ciento del repertorio de células *T* de una persona desencadene la replicación no deseada de las escasas células *T* circulantes que reconocen lo que es propio del organismo. (El sistema inmunitario elimina, o inactiva, las células *T* autorreactivas, aunque, ocasionalmente, algunas pueden escaparse del mecanismo de vigilancia.)

En consonancia con esta idea, se han relacionado las células *T* que llevan ciertos tipos de V_β con el desarrollo de diversas enfermedades autoinmunitarias, incluidas la artritis y la esclerosis múltiple. Estos hallazgos indican que las células destructivas podrían activarse por un superantígeno que se uniera a los tipos de V_β identificados. Más aún, la investigación dirigida por Barry C. Cole, de la Universidad de Utah, ha puesto de manifiesto que un superantígeno producido por el *Mycoplasma arthriditis* puede provocar la artritis en múridos.

Por otra parte, existen datos que sugieren que los superantígenos pueden deprimir, llegado el caso, el sistema inmunitario. Los clones de células *T*, resultado de la excitación por superantígenos, desaparecen a menudo, o se tornan inactivos, una vez producida la estimulación. Y varios grupos han señalado que al menos uno de los superantígenos Mls conduce a la destrucción de varios subgrupos de células *T* en el ratón.

De ello podría derivarse la aparición de un cáncer. Con la destrucción de un volumen considerable de células *T*, al sistema inmunitario podría costarle detectar y eliminar las células cancerosas. En efecto, la desaparición de células *T* podría explicar en parte por qué el virus del tumor mamario del ratón —portador de genes que codifican superantígenos Mls— da lugar a tumores.

Algunos han propuesto que los superantígenos podrían contribuir a la inmunodeficiencia del SIDA. Por razones que siguen siendo misteriosas, el número de células *T* auxiliares en personas infectadas por el virus del SIDA (VIH), causante de la inmunodeficiencia humana, desciende de manera espectacular, dejando a los pacientes vulnerables a infecciones graves que pueden llevarle a la muerte. El año pasado Luisa Imberti y Daniele Primi, de la Universidad de Brescia, señalaron la ausencia clamorosa de células *T* con determinados tipos de V_β en un grupo de

pacientes HIV-positivos, una “huella” a esperar si están involucrados uno o más superantígenos. La idea, entre otras explicaciones razonables de la muerte de las células *T* asociada con el VIH, se mueve en el terreno de la pura hipótesis, pero no deja de ser sugestiva.

Hasta aquí nos hemos centrado en el nexo entre alteraciones inmunitarias inducidas por superantígenos y la actividad de las células *T* auxiliares. Pero no debiéramos pasar por alto los posibles efectos nocivos de los superantígenos sobre las células *B*. En estudios realizados en los años setenta, Johnson descubrió que las enterotoxinas estafilocócicas promovían en ocasiones la producción de anticuerpos por parte de las células *B*, y en otras la inhibían, a tenor del estado inicial de la estimulación inmunitaria. Los estudios de Johnson indicaban también que la inhibición de la producción de anticuerpos se hallaba mediada por las células *T* supresoras.

Tanto la estimulación como la supresión podrían ser destructivas. La inhibición de la producción de anticuerpos puede deprimir el funcionamiento inmunitario. Una producción excesiva podría acarrear alteraciones inmunitarias complejas, en las que los anticuerpos atrajeran diversos componentes del sistema inmunitario hacia los tejidos normales, que quedarían atorados, impidiendo así su funcionamiento normal.

La investigación sobre los superantígenos no se limita a traer luz sobre las causas de enfermedad. Llega hasta su tratamiento. Según hemos sugerido antes, los péptidos sintéticos pueden inhibir los superantígenos, al competir por los sitios de unión en las células *T* auxiliares o en las moléculas del CMH.

Y, por extraño que parezca, el aporte controlado de superantígenos seleccionados podría ejercer efectos terapéuticos en algunas enfermedades. En este sentido, los experimentos con roedores sugieren que ciertos superantígenos podrían poner fuera de combate poblaciones indeseables de células *T* y prevenir así ataques autoinmunitarios sobre los tejidos normales. Mediante la administración de enterotoxina B a ratones, Caius Kim, de la Universidad de Toronto, consiguió aliviar la gravedad de la nefritis lúpica, una enfermedad autoinmunitaria. Semejantemente, al dar la misma toxina a ratones, nuestro grupo, en colaboración con Joel Schiffenbauer y Jeanne M. Soos en Gainesville, logró proteger a los animales frente a la esclerosis múltiple experimental. Y a la inversa, podrían administrarse superantígenos para apuntalar un sistema inmunitario deprimido estimulando la proliferación de las células *T*, si controlásemos su tendencia aniquiladora de células *T*.

A respaldar esa nueva terapia ha venido el descubrimiento sorprendente de Nathan D. Griggs, de Gainesville: no sólo la toxina A, sino también un pequeño fragmento de la misma está capacitado para activar las células *T*. La investigación con otras proteínas ha puesto de manifiesto que los fragmentos bloquean a menudo la actividad de la proteína entera (por competir en la ocupación del lugar de engarce en la molécula codiciada), si bien no suelen reproducir el efecto que logra el polipéptido completo. El hallazgo de Griggs abona la posibilidad de diseñar un día fármacos superantigénicos mezclando y emparejando fragmentos con propiedades seleccionadas.

La esperanza de hallar una terapia de las enfermedades inducidas por superantígenos y la posible utilización de los superantígenos para corregir alteraciones inmunitarias sirven de acicate para la investigación. Con toda seguridad se irán identificando otros superantígenos y conoceremos mejor las causas y los posibles tratamientos de enfermedades inmunitarias consideradas, hoy por hoy, incurables.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

ENTEROTOXINS. Merlin S. Bergdoll en *Staphylococci and Staphylococcal Infections*, vol. 2. Dirigido por C. S. F. Easmon y C. Adlam. Academic Press, 1983.

THE STAPHYLOCOCCAL ENTEROTOXINS AND THEIR RELATIVES. Philippa Marrack y John Kappler en *Science*, vol. 248, págs. 705-711; 11 de mayo de 1990.

STRUCTURAL BASIS FOR DIFFERENTIAL BINDING OF STAPHYLOCOCCAL ENTEROTOXIN A AND TOXIC SHOCK SYNDROME TOXIN 1 TO CLASS II MAJOR HISTOCOMPATIBILITY MOLECULES. Carol H. Pontzer, Jeffry K. Russell y Howard M. Johnson en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 88, n.º 1, págs. 125-128; 1 de enero de 1991.

BOTH α-HELICES ALONG THE MAJOR HISTOCOMPATIBILITY COMPLEX BINDING CLEFT ARE REQUIRED FOR STAPHYLOCOCCAL ENTEROTOXIN A FUNCTION. Jeffry K. Russell, Carol H. Pontzer y Howard M. Johnson en *Proceedings of the National Academy of Sciences*, vol. 88, n.º 16, págs. 7228-7232; 15 de agosto de 1991.

STAPHYLOCOCCAL ENTEROTOXIN MICROBIAL SUPERANTIGENS. Howard M. Johnson, Jeffry K. Russell y Carol H. Pontzer en *FASEB Journal*, vol. 5, n.º 12, págs. 2706-2712; septiembre de 1991.



El reactor termonuclear experimental internacional

Este reactor de fusión de tipo tokamak será el más potente de todos los construidos hasta la fecha. Mediante la fusión de deuterio y tritio, el ITER deberá generar más energía de la que consume

Robert W. Conn, Valery A. Chuyanov, Nobuyuki Inoue y Donald R. Sweetman

En su encuentro cumbre de noviembre de 1985 en Ginebra, Mijail Gorbachov y Ronald Reagan abordaron temas de interés mundial: la defensa estratégica, el control de armamentos y los derechos humanos, entre otros. En el comunicado final había una declaración, desconocida para muchos, que ha conducido a un proyecto sin precedentes en la historia de la cooperación internacional en ciencia y técnica. Ambos líderes hacían un llamamiento para trabajar conjuntamente en el desarrollo de la energía de fusión "en beneficio de la humanidad". En respuesta, científicos e ingenieros de los principales programas mundiales de investigación sobre fusión —acometidos por la Comunidad Europea, Comunidad de Estados Independientes, Japón y EE.UU.— acordaron en 1987 embarcarse en un proyecto común para diseñar un dispositivo experimental de fusión. Así nació el proyecto "Reactor Termonuclear Experimental Internacional", o ITER, siglas de su denominación inglesa.

Quedan unos trece años para la culminación prevista del ITER. Su capacidad de generar más de mil veces la potencia de los reactores de fusión actuales convertirá al ITER en experimento casi definitivo en la búsqueda de un dispositivo práctico de este género. El conocimiento científico y de ingeniería que a través del mismo se obtendrá debería permitir la operación de una central de energía de fusión, tal vez antes de 30 años.

1. CAMARA DE PLASMA en el interior de los tokamak. Esta del prototipo JT-60 en Naka, Japón, se halla revestida de losetas de fibra de carbono para protegerla del enorme calor generado por el plasma. Los costados forman la llamada primera pared. Las puertas de acceso encierran el equipo que calienta el plasma y lo controla.

Ciertamente, las perspectivas de domeñar la fusión han dado lugar a serios compromisos entre las cuatro potencias involucradas. En julio del año pasado, los participantes acordaron acometer un programa de seis años para proyectar la ingeniería definitiva del reactor ITER. Los centros de proyectos se ubicarán en la Universidad de California en San Diego, el Instituto Max Planck de Física del Plasma de Garching y el Centro de Investigación sobre Fusión de Naka del Instituto Japonés de Investigación de la Energía Atómica. La supervisión general correrá a cargo de un consejo del ITER que tendrá la sede en Moscú. Cada grupo se ha comprometido a una aportación anual próxima a los cuarenta millones de dólares para pagar los gastos de proyectos, investigación, desarrollo y pruebas requeridos.

Con espíritu de cooperación (y en homenaje a la diplomacia), las cuatro partes acordaron que un europeo encabezara el equipo central de diseño, un japonés ocupara la vicepresidencia primera, un ruso dirigiera el centro de San Diego, un americano el de Garching, un europeo el de Naka y un ruso presidiera el consejo del ITER. El que estos complicados nombramientos se hicieran en menos de nueve meses demuestra la seriedad de todas las partes implicadas.

¿Cuál es la razón de tal seriedad, por qué se ha elegido la fusión y por qué en este momento? ¿Qué apariencia tendría la máquina ITER, y qué podría realizar? Los autores nos centramos en tales cuestiones cuando trabajábamos en el Comité Consultivo Científico y Técnico del ITER durante la fase de anteproyecto. Las respuestas que daremos aquí son conclusiones a las que llegó este equipo internacional. Son también resultado de una tenaz investigación científica que se inició hace más de cuarenta años (véase "Reactores de fusión por confinamiento magnético", de Robert W. Conn; INVESTIGACION Y CIENCIA, diciembre de 1983).

Prosigue la búsqueda de un reactor práctico, ya que la fusión libera una enorme cantidad de energía a partir de una pequeña cantidad de combustible, en un proceso por el cual generan energía el Sol y las estrellas, según determinara Hans A. Bethe, de la Universidad Cornell, a finales de los años treinta. Para producir energía, los reactores de fusión emplearán dos isótopos del hidrógeno: el deuterio, que posee un neutrón adicional y se le denomina a veces hidrógeno pesado, y el tritio,

ROBERT W. CONN, VALERY A. CHUYANOV, NOBUYUKI INOUE y DONALD R. SWEETMAN pertenecieron al comité consultivo del ITER durante su fase de anteproyecto. Conn, doctor por el Instituto de Tecnología de California (Caltech), es profesor de ingeniería nuclear y director del Instituto de Investigación sobre Plasma y Fusión de la Universidad de California en Los Angeles. Chuyanov ha dirigido varios proyectos tokamak en Rusia. Formado en la Universidad de Moscú, encabeza el departamento de ingeniería física del Instituto I. V. Kurchatov de Energía Atómica. Inoue, doctor por la Universidad de Kyoto, enseña ingeniería nuclear en la de Tokyo. Sweetman, físico de plasma en el laboratorio de Culham en Abingdon, Reino Unido, es también director ejecutivo de investigación sobre fusión del Ente Británico para la Energía Atómica. Se recibió de doctor en la Universidad de Birmingham.

que tiene dos neutrones extra. Estos núcleos se fusionan con un rendimiento mucho mayor que cualquier otra combinación de núcleos ligeros. El hidrógeno ordinario, combustible solar, se fusiona mucho más lentamente (para nuestra fortuna, pues, si así no fuera, la vida del Sol y del universo se desvanecería muy pronto).

De análoga importancia es la fácil obtención del combustible para los reactores de fusión. El deuterio se encuentra en el agua en estado natural: uno de cada 6700 átomos de hidrógeno posee un núcleo de deuterio. El tritio, que abunda menos, es radiactivo y su vida media se cifra en 12,3 años, por lo que no aparece en la naturaleza, si bien puede producirse a partir de una rica reserva: los yacimientos de litio metálico.

Los reactores de fusión nuclear prometen ser benignos con el entorno. No es posible una reacción de escape accidental, puesto que las cantidades de deuterio y tritio presentes en la máquina en todo momento son pequeñas y cualquier ignición incontrolada consumiría rápidamente el combustible disponible para extinguirse después. Además, la fusión deuterio-tritio genera sólo neutrones energéticos y partículas alfa (núcleos de helio), que no son radiactivos. La principal preocupación en cuanto a la radiación se circunscribe a un proceso secundario: los neutrones energéticos pueden transmutar los núcleos de los materiales que constituyen la estructura y componentes del reactor, materiales que se convertirían entonces en radiactivos. Pero la investigación ha mostrado que con una selección apropiada de los materiales de construcción se podría mantener muy bajo el nivel de radiactividad inducida.

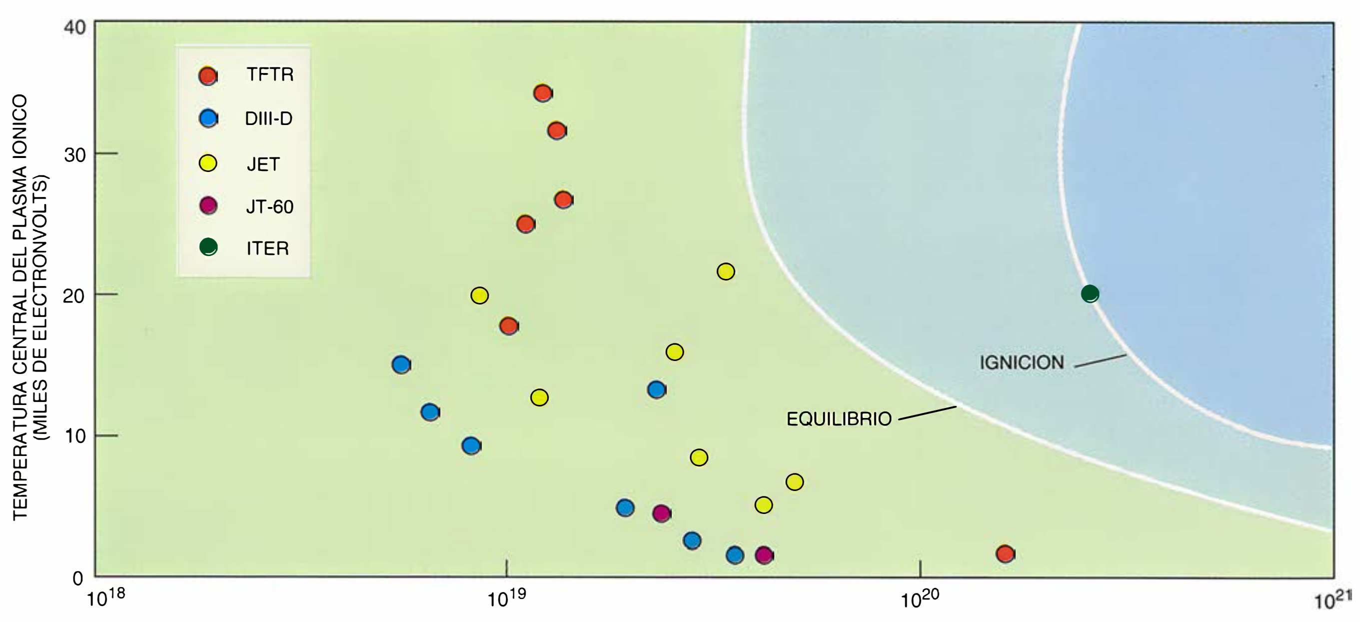
A pesar de los años que se lleva trabajando en la fusión, resulta muy difícil conseguir que los núcleos, cargados positivamente, se combinen para producir energía en cuantía aprovechable. Para superar la repulsión eléctrica natural, los núcleos han de alcanzar niveles energéticos altísimos. El deuterio y el tritio deben llegar a cincuenta millones de grados kelvin (por mor de comparación, el centro solar se halla a sólo quince millones). Esta temperatura, equivalente a una energía de 4500 electronvolts, representa la temperatura de ignición del combustible.

A tales temperaturas, los núcleos son despojados de sus electrones. (Para ionizar el hidrógeno bastan 13,56 eV.) El conjunto de deuterio y tritio se llama entonces, con mayor propiedad, plasma, es decir, reunión, eléctricamente neutra, de núcleos dotados de carga positiva y electrones portadores de carga negativa.

Uno de los objetivos clave de la investigación en fusión ha sido cómo mantener elevada la temperatura del plasma. En efecto, la energía se pierde a través de procesos diversos; por ejemplo, la radiación de energía electromagnética emitida por las partículas cargadas del plasma al interactuar entre sí, o el fácil escape del plasma de los neutrones energéticos producidos en cantidades ingentes por la fusión. La radiación, la conducción del calor y la convección turbulenta de partículas del plasma son algunos procesos de los varios que rebajan la temperatura del plasma con el tiempo.

Es obvio que podríamos guardar viva la hoguera de plasma mediante la inyección de energía desde el exterior, con ondas de radiofrecuencia o haces de partículas neutras de alta energía. Existe, sin embargo, una fuente eficiente y automantenida de calor adicional: las partículas alfa energéticas producidas. Estos núcleos de helio son las cenizas primeras de las reacciones de fusión; su energía se aproxima a los 3,5 millones de eV; y, merced a su doble carga positiva, se dejan confinar fácilmente mediante campos magnéticos. En caso de que colisionaran con las partículas del plasma, las partículas alfa cederían su energía en forma de calor. Hasta la fecha, ningún experimento ha podido generar un número suficiente de partículas alfa energéticas que compense enteramente la pérdida de energía térmica.

Llámase tiempo de confinamiento de la energía al tiempo global medio

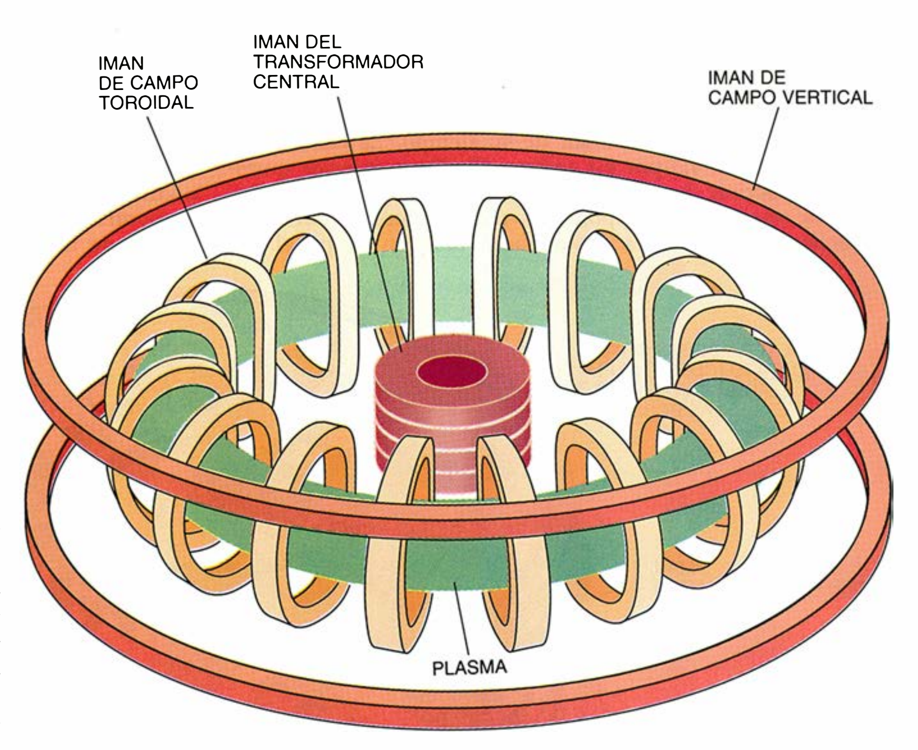


2. SITUACION DE EQUILIBRIO ("Breakeven"), a punto de alcanzarse en los tokamak actuales: TFTR, DIII-D, JET y JT-60. Para llegar a ese estado, la calidad de confinamiento —esto es, el producto de la densidad del plasma por el tiempo de escape medio de la energía— debe valer al menos 5×10^{19} segundos por metro cúbico. El ITER se ha diseñado para decuplicar dicho valor a una temperatura central del plasma de unos 20.000 eV. Debería entonces producirse la ignición, en la que la energía producida por fusión mantiene la combustión del plasma.

que tarda el calor en escapar del plasma. Ese parámetro se simboliza con la letra griega tau, τ. El producto del tiempo de confinamiento por la densidad del plasma, n, indica la capacidad del plasma para retener el calor; se denomina calidad de confinamiento. En términos prácticos, para que una reacción de fusión se automantenga y suministre energía utilizable, $n\tau$ debe ser mayor que 2×10^{20}, en unidades de segundos y partículas por metro cúbico, a una temperatura, T, equivalente a 10.000 eV (unos 100 millones de kelvins). La investigación en fusión se propone, pues, conseguir el triple producto de n, τ y T en torno a 2×10^{24} segundo-eV por metro cúbico.

El proyecto que, con mucho, se ha acercado más al cumplimiento de estas condiciones es el tokamak. Concebido al comienzo de los cincuenta por los físicos rusos Andrei D. Sajarov e Igor Y. Tamm, el tokamak deriva su nombre de las palabras rusas para cámara magnética toroidal. Sus principios son bastante elementales. El plasma se produce primeramente en una cámara de vacío con forma de toro o rosquilla. Un grupo de electroimanes, instalado en el exterior de esa cámara, produce un campo magnético toroidal según el eje de la "rosquilla". Dicho campo actúa a modo de un manguito que conserva la presión dentro del plasma y le mantiene apartado de las paredes de la cámara.

Otro conjunto de electroimanes externos, colocados en el centro del toro (el hueco de la rosquilla), se utiliza para inducir en el plasma una corriente, que circula en la dirección toroidal. Esta corriente calienta el plasma hasta una temperatura cercana a los 1000 eV y crea un campo magnético que forma bucles en torno al toroide. Dicho campo impide que las partículas del plasma salgan impelidas hacia el exterior de la zona principal de confinamiento. Por último, los conductores externos generan un campo magnético vertical que impide que el plasma se mueva hacia arriba y hacia abajo, o hacia dentro y hacia fuera, en el interior de la cámara.



3. LA NOCION DE TOKAMAK se basa en tres juegos de electroimanes. Una serie de bobinas produce un campo toroidal que actúa de conducto tubular para confinar el plasma. Las bobinas del transformador central inducen una corriente eléctrica que circula por el plasma siguiendo la dirección toroidal y lo calienta. Las bobinas de campo vertical mantienen centrado el plasma y en equilibrio estable.

Hasta mediados los años sesenta, la antigua Unión Soviética fue la única nación que prosiguió en serio el desarrollo del prototipo tokamak. Sucedió entonces que Lev A. Artsimovich y su equipo del Instituto de Energía Atómica I. V. Kurchatov de Moscú lograron prolongar el tiempo de confinamiento de la energía y aumentar significativamente la temperatura del plasma. Sus éxitos desencadenaron el interés mundial por la investigación en tokamak.

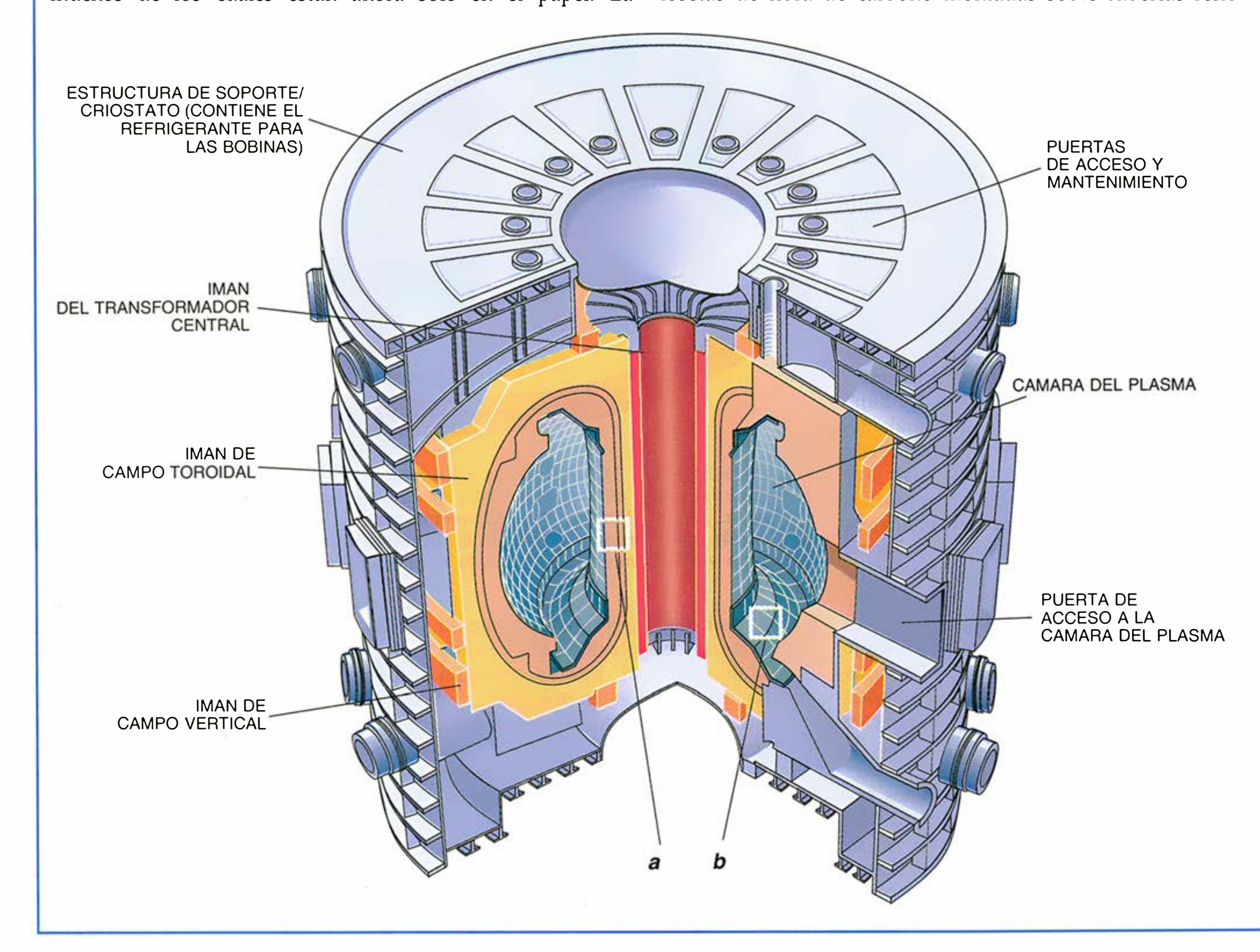
El resultado se ha traducido en sustanciales progresos del proyecto. A mitad de los setenta los dispositivos tokamak alcanzaron la temperatura de 3000 eV y unos valores de la calidad de confinamiento en torno a 10^{18} segundos por metro cúbico. Los tokamak experimentales más potentes en operación —Toro Europeo Conjunto ("Joint European Torus", o JET), el tokamak JT-60 en Japón y los norteamericanos Reactor Tokamak Experimental de Fusión ("Tokamak Fusion Test Reactor", o TFTR) y los prototipos DIII-D— han alcanzado temperaturas del plasma de 30.000 eV y valores de la calidad de confinamiento de 2×10^{19} segundos por metro cúbico. Globalmente, el triple producto de densidad, tiempo de confinamiento y temperatura se ha multiplicado por más de cien en los últimos veinte años.

El pasado octubre el equipo del JET consiguió otro importante avance. Utilizando deuterio y tritio, el tokamak produjo más de un millón de watts de potencia de fusión durante dos segundos, energía que sobrepasa en dos órdenes de magnitud la energía producida en anteriores experimentos de fusión controlada. Vale la pena destacar, además, que el resultado confirmaba el comportamiento previsto. Pasado el verano de 1993 pueden obtenerse resultados más impresionantes, una vez que el TFTR inicie sus propios experimentos con deuterio-tritio. Se espera que estas reacciones generen una potencia de fusión de 30 millones de watts, cifra que viene a ser aproximadamente igual a la potencia necesaria para mantener el plasma; se llegaría entonces al estado de equilibrio ("breakeven").

Debemos reseñar otros dos indicadores de progreso, más sutiles: el factor beta y el flujo de circulación del plasma. Por factor beta se entiende la razón entre la presión del plasma y la presión ejercida por el campo magnético externo que mantiene el plasma; mide el grado de eficacia de los imanes en el confinamiento del plasma. Para una presión del plasma dada, cuanto mayor sea el valor de beta menor será el campo magnético (y, por tanto, los imanes podrán ser más pequeños y económicos). En los ensayos de mediados de los setenta, los valores de beta se movían en torno al uno por ciento, lo que se traduce entre un dos y un seis por ciento menos de lo deseable para los tokamaks prácticos. Se ha conseguido aumentar beta mediante la remodelación de la sección eficaz

Tokamak ITER

Con sus 25 metros de altura, este reactor experimental será el mayor tokamak de su tiempo. La cámara del plasma medirá 4,3 por 8,4 metros. El dibujo inferior muestra, en sección, los elementos principales del ingenio. Debemos resaltar los componentes para protección del calor, muchos de los cuales están ahora sólo en el papel. La estructura terminada (*a*) constaría de tres partes: la primera pared, la envoltura y el escudo. Dicha configuración no se limitaría a la función de aislamiento, sino que también podría regenerar tritio. El calor procedente del plasma encuentra inicialmente la primera pared, levantada con losetas de fibra de carbono montadas sobre tuberías refri-



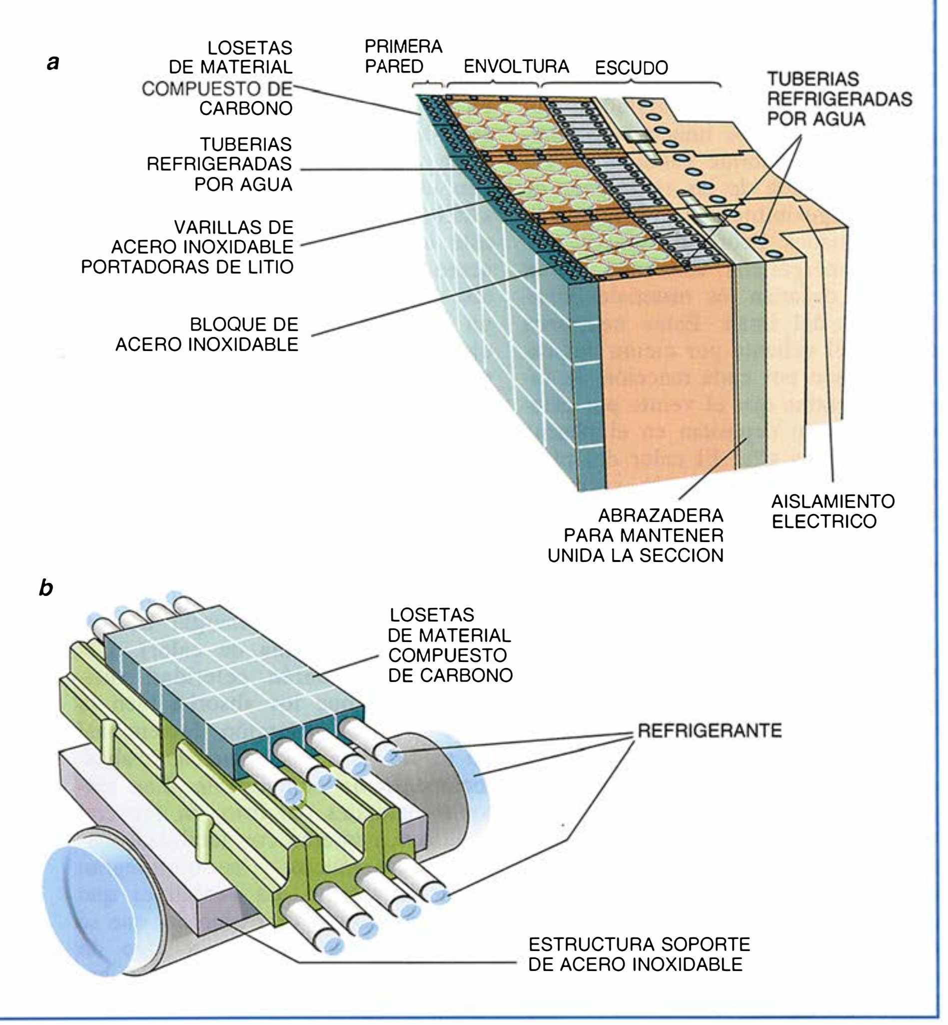
del plasma (convirtiendo el círculo en elipse vertical), entre otras técnicas. El tokamak DIII-D de la General Atomics en San Diego ha logrado el valor más alto de beta, aproximadamente diez por ciento, valor que sobrepasa de lejos la cifra deseada y demuestra un importante aspecto de la viabilidad económica de estos modelos de confinamiento magnético.

Vayamos con el segundo indicador, o cómo mantener el flujo de corriente en el plasma. Esta corriente se induce por electroimanes externos. Ahora bien, las leyes de la electrodinámica afirman que una corriente continua inducida sólo puede mantenerse mediante un campo magnético de intensidad siempre creciente, y que no circulará corriente alguna si el campo magnético permanece constante. Las bobinas externas inductoras de la corriente del plasma deben, por tanto, generar un campo que aumente indefinidamente, lo que es imposible en la práctica. Y así, transcurrido cierto tiempo, los técnicos tienen que desactivar el plasma y, luego, restaurar al nivel original la corriente que pasa por las bobinas. Sólo un medio externo, no inductivo, de mantener la corriente del plasma puede conseguir un funcionamiento regular del mismo.

En 1971 Roy J. Bickerton, Jack W. Conner y J. Bryan Taylor, del laboratorio de Culham en Abingdon, sugirieron un procedimiento para mantener la corriente, basado en la predicción de que el efecto combinado del gradiente de presión radial y las fuerzas viscosas paralelas al campo, actuando en el seno de plasmas a temperaturas suficientemente elevadas, produciría una corriente toroidal autoexcitada. Esta corriente eléctrica autoexcitada se denomina corriente de autodocimancia (también, de autocebado; en inglés, "bootstrap"). Por fin, parecía que la naturaleza podría ofrecer graciosamente algo que posibilitara el funcionamiento de los tokamak en régimen permanente. Los experimentos para confirmar la existencia de la corriente autodocimante no dieron ningún resultado hasta 1989, año en que la detectaron, primero, el TFTR y, después, el JET y el JT-60.

Para la viabilidad de la operación importan sobre todo los resultados

geradas por agua. La envoltura absorbería los neutrones producidos en la reacción, y para la autorregeneración del tritio podría contener litio y quizá berilio en varillas de acero inoxidable. El escudo estaría formado por estructuras de acero inoxidable refrigeradas por agua y absorbería radiación y calor. Otro componente de interés sería el desviador (*b*) que absorbería la energía de las partículas cargadas del plasma.



obtenidos con la corriente de autocebado en el JT-60. En ciertos casos, hasta un ochenta por ciento de los 500.000 ampères de la corriente del plasma provenían de la corriente autodocimante. En experimentos distintos, se logró mantener corrientes toroidales del plasma de dos millones de ampères.

No obstante el progreso alcanzado en la investigación, quedan puntos pendientes. Seguimos sin conocer la naturaleza fundamental del transporte turbulento de las partículas y el calor a través de las líneas fuerza del campo magnético, proceso que rebaja la temperatura del plasma. Es asimismo incompleto cuanto sabemos sobre la física de la ignición y del proceso de combustión en una fusión alimentada. El ITER abordará estos asuntos. Su principal objetivo es el de lograr condiciones de encendido y quemado del plasma que sean las típicas de un verdadero reactor de fusión y someter a prueba y demostración las técnicas requeridas para la fusión operativa.

Las metas del programa ITER las estableció un acuerdo internacional en el que intervinieron de cuarenta a sesenta profesionales, entre ellos nosotros y demás miembros del comité consultivo. El equipo trabajó en común durante largos períodos en el Instituto Max Planck de Física del Plasma, de 1987 a 1990, y sus componentes se reunían a menudo con el comité consultivo en el Organismo Internacional para la Energía Atómica en Viena, entidad oficial anfitriona del programa. Tras definir las características técnicas de la máquina tokamak del ITER, el equipo procedió a elaborar un anteproyecto de instalación; desarrolló luego un plan para el programa de operación e investigación, asunto éste importante porque la máquina funcionará al menos durante quince años.

El equipo también acordó un calendario de operaciones para el ITER. Se construirá entre 1997 y 2004, para entrar en funcionamiento en 2005. Por supuesto, este calendario depende de la continuidad del acuerdo entre los participantes, garantía minada por los vaivenes políticos. Es de esperar, a pesar de todo, que se decida de aquí a cuatro años el lugar de instalación, por más que los países participantes dispongan de un año más de gracia.

Ciframos en unos mil millones de dólares los gastos de proyectos de ingeniería, investigación y desarrollo, coste que habrán de abonar a partes iguales las cuatro potencias y que cubrirá los seis años del período de diseño. La construcción del ITER costará unos 5800 millones de dólares durante los seis o siete años que para ello se necesitan, estando todavía por decidir si ese montante se dividirá entre los cuatro a partes iguales o si pagará más el país anfitrión del proyecto para compensar los beneficios a su economía local. Mientras se procede a la construcción, habrá que pensar también una cantidad adicional de 500 millones de dólares para investigación y desarrollo. La suma de estas cifras arroja un coste total de proyecto y construcción de unos 7500 millones de dólares distribuidos en trece años.

Tras la construcción, el programa del ITER constará de dos etapas principales. La primera, llamada la etapa de la física, durará de seis a ocho años; a lo largo de esa fase, se tratará de lograr condiciones de ignición y combustión del plasma similares a las que imperan en un reactor de fusión operativo. Pasado el arranque inicial y una prueba completa, el esfuerzo de investigación se concentrará en la la operación estable del plasma y en los requisitos técnicos para la fusión del deuterio y el tritio. Se estudiarán también los efectos del calentamiento del plasma por partículas alfa, la dinámica y el control del quemado del plasma, así como la difusión y retirada del helio una vez que ha cedido toda su energía.

La última etapa consistirá en un programa de varios años que estará consagrado a la técnica e ingeniería.

En la fase de la física se habrán ensayado ya muchas técnicas; en particular: el funcionamiento de imanes superconductores, los sistemas de calentamiento del plasma y mantenimiento de la corriente, los dispositivos de renovación de combustible y extracción de residuos, los instrumentos de mantenimiento a distancia y los sistemas de apoyo externo. La fase de la técnica pondrá a prueba la operación integrada y la resistencia del equipo (su duración), así como materiales y diseños alternativos.

El resultado del diseño y la ingeniería debería ser un reactor capaz de generar 1000 megawatts a partir de la fusión del deuterio y el tritio. Constituiría toda una hazaña. La potencia de fusión resultante que se ha proyectado es tres órdenes de magnitud mayor que la conseguida por el JET, el reactor de fusión más potente en la actualidad. El sistema del plasma operará inicialmente en un modo intermitente de pulso, manteniendo la actividad por más de tres minutos antes de que deba reajustarse la corriente en las bobinas transformadoras. Andando el tiempo, el plasma tendría que poder funcionar de manera regular, valiéndose de alguna combinación de la corriente natural de autocebado y de un sistema complementario que excite la corriente. En el JT-60 y el TFTR se está estudiando un sistema de ese tipo. La corriente del plasma debería alcanzar ahí unos 25 millones de ampères, sobrepasando en 20 millones de ampères la corriente utilizada en el JET. Las dimensiones del tokamak del ITER doblarán, aproximadamente, las del mayor de los que operan ya: la sección transversal elíptica del toro tendrá 4,3 metros de ancho por 8,4 metros de alto y el radio principal medirá algo más de seis metros.

Para confinar el plasma, dieciséis imanes superconductores en forma de D generarán el intenso campo magnético toroidal. Con 14,8 metros de altura y 7,1 de anchura, estos imanes superconductores serán los mayores del mundo. El alambre superconductor, hecho de una aleación de niobio y estaño embutida en cobre, se mantendrá a una temperatura de unos 4,5 kelvins mediante helio líquido y estará capacitado para transportar una corriente de 35.000 ampères. Cada bobina poseerá 240 espiras de este alambre.

El sistema generaría así un campo magnético de 4,85 teslas en el centro del plasma. Pero, merced al carácter toroidal del confinamiento, el campo máximo producido en la rama vertical interna de la D es de 11,2 teslas. Este campo, que es 200.000 veces el campo magnético terrestre medio, almacena ocho veces más energía que los electroimanes de los actuales tokamak. Otros imanes superconductores producirán el flujo del transformador y darán forma a la sección transversal del plasma.

Deben mantenerse aislados del plasma cercano los imanes superconductores. La enorme cantidad de calor desprendida de las reacciones de fusión imposibilitaría la refrigeración de los imanes. Peor todavía: los neutrones energéticos liberados en la reacción dañarían los materiales componentes del imán. Estos neutrones aportan el ochenta por ciento del calor liberado por cada reacción de fusión, mientras que el veinte por ciento restante lo depositan en el plasma las partículas alfa. El calor del plasma escapa en forma de radiación electromagnética (principalmente rayos X) y de partículas cargadas que han conseguido difundirse fuera del cuerpo principal del plasma.

La cámara toroidal que encierra el plasma es la primera capa de protección frente al calor. Esta primera pared se levantará con planchas de acero inoxidable enfriadas por agua y recubiertas por losetas de fibra de carbono para proteger dichas planchas contra la fundición y la fatiga térmica. Esta conformación remeda otra estructura experimentada ya en condiciones extremas: las placas inferiores del transbordador espacial, que protegen a la nave durante su reentrada. Las losetas, de fácil sustitución en tareas de mantenimiento, deberán soportar temperaturas superiores a 1800 kelvins y radiarán la mayor parte del calor que absorban.

El calor que escapa en forma de partículas cargadas seguirá las líneas de fuerza magnética hasta las zonas superior e inferior de la cámara del plasma. Allí, el desviador ("divertor"), un sistema especial de placas, absorberá alrededor de 100 megawatts. El desviador es uno de los elementos cruciales del ITER, pues la carga de potencia que recibe puede aproximarse a 25 millones de watts por metro cuadrado. A modo de comparación, recordemos que la radiación solar media incidente en la parte superior de la atmósfera es de unos 1300 watts por metro cuadrado. Entra dentro de lo proyectado que el desviador se construya con losetas de fibra de carbono unidas a un sumidero de calor refrigerado, pero habrá que investigar y ensayar mucho más.

Detrás de la primera pared habrá un sistema de 1,5 metros de espesor, que comprenderá la envoltura y el escudo. Este sistema, pieza central de la técnica del ITER, es el único por someter a ensayo entre los principales. Se han aportado varios proyectos, y se optará por el definitivo en los próximos seis años, durante la fase de ingeniería de diseño.

En uno de los proyectos se exponen las características esenciales del sistema. Y así exige que la envoltura esté formada por varillas huecas de acero inoxidable, rellenas con bolitas, de un milímetro de diámetro, de un material cerámico de litio, por ejemplo, un óxido de litio o un aluminato de litio. (Otra posibilidad sería que el litio se dispusiera en capas de conglomerado.) Por el exterior de las varillas pasaría agua refrigerante para eliminar el calor, manteniendo las esferas en el intervalo de 670 a 870 kelvins.

Con semejante estructura, la envoltura debería ser capaz de disipar la mayor parte de la energía de los neutrones (en forma de calor). Los neutrones perderán celeridad suficiente para que los absorba bien la envoltura. La absorción deviene así un medio de autogeneración, o abastecimiento de combustible. Los isótopos naturales del litio, en especial el litio 6, capturan con facilidad neutrones energéticos y se desintegran en helio y tritio. La verdad es que podría producirse más tritio del que se consume si se introdujera algo de berilio en la envoltura. Cuando el berilio absorbe un neutrón energético, produce dos neutrones secundarios adicionales que pueden ser capturados por el litio.

El tritio producido en las varillas se propagará desde las bolitas cerámicas de litio. Por el interior de los tubos de acero circula helio gaseoso a baja presión, depurándolos y arrastrando el tritio hacia un sistema de recuperación y reciclaje. El gas sirve también para facilitar la transferencia de calor desde la pila de esferas de litio hasta las paredes del tubo contenedor.

Detrás de esta zona de autorregeneración del tritio y remoción del calor se halla la barrera final a los imanes: el escudo refrigerado por agua. Aunque construido principalmente de acero inoxidable, el escudo también contendrá plomo y carburo

de boro, combinación idónea para amortiguar los neutrones que escapan de la envoltura. Por cada watt de potencia neutrónica que atraviesa la primera pared, no llegan a sesenta los microwatts de calor que alcanzan el sistema de imanes. Además, el escudo bloquea los rayos gamma generados en la interacción de los neutrones con los átomos de la envoltura. Por consiguiente, sirve para proteger a las personas de la exposición a la radiación.

Habrá que ir disponiendo de otros sistemas para que el reactor ITER funcione a pleno rendimiento. Por citar algunos: precisará de un medio de inyectar deuterio y tritio para reaprovisionar el plasma; también, de un sistema de extracción capaz de evacuar el helio y mantener el vacío en el toro. La radiactividad del toro implica que se vaya pensando en utilizar robots para el mantenimiento.

Una central de energía de fusión, que produzca electricidad, requerirá en último término un sistema para recobrar el calor generado por la reacción. El refrigerante de la envoltura y el escudo servirían para dicho propósito, transportando los aproximadamente 2500 megawatts de energía calorífica producidos por el reactor. Dicho refrigerante cedería su calor a través de un generador de vapor, gas que impulsaría una turbina para producir unos 1000 megawatts de corriente eléctrica.

Aunque el propio reactor ITER va a construirse para someter a prueba y ensayo los componentes integrados de un tokamak, no producirá electricidad. Los requisitos exigibles a un reactor generador de electricidad se ensayarán en la segunda parte del programa de operaciones del ITER, lo que quizás entrañe la modificación de materiales y diseños en el mecanismo básico del ITER.

Esta segunda parte del programa del ITER se dedicará, por consiguiente, a estudiar nuevos materiales y conceptos que resulten más adecuados para una planta energética. Para la envoltura y el escudo, se someterán a prueba aleaciones de vanadio y cerámicas de carburo de silicio reforzadas con fibra, materiales menos propensos a devenir radiactivos que el acero inoxidable. Se ha señalado también la oportunidad de emplear litio o una aleación de litio y plomo en estado líquido para generar tritio. Al ser líquido, el litio actuaría a la vez como refrigerante.

Para comprobar la idoneidad de los proyectos, debe fijarse una intensidad de flujo neutrónico lo suficientemente elevada para que los resultados puedan extrapolarse a una central energética. En el ITER, el flujo de neutrones de fusión primarios será de 1,2 megawatts por metro cuadrado, apropiado para observar cuál será el rendimiento de un modelo determinado de envoltura y escudo. Las alteraciones en las propiedades térmicas y físicas de los compuestos cerámicos podrán detectarse al mes de exposición continua, o su equivalente. Pasados de uno a tres años, podrán analizarse los cambios experimentados en las propiedades de las estructuras metálicas.

Debido a su larga duración, estas pruebas sobre el cambio de propiedades pueden acometerse en una máquina de fusión distinta del ITER, mucho más pequeña. Las pruebas realizadas en el ITER requerirán que el dispositivo funcione continuamente durante una semana o más en cualquier momento. Cuando se considera el número de pruebas combinado con el tiempo que ocupa cada una de ellas y con la variedad de diseños, se hace evidente la necesidad de un programa de muchos años. El programa demuestra, asimismo, la importancia de la misión tecnológica del ITER como central piloto de energía de fusión.

El programa ITER puede también aportar nuevas ideas en otros sentidos. Los proyectos de ciencia de altura ("Big science"), tales como el Supercolisionador Superconductor y el Proyecto del Genoma Humano, se hallan ahora en el límite presupuestario de los EE.UU. Por contra, el ITER, gestado y nacido en cuna internacional, podría indicar un nuevo rumbo para los proyectos científicos de largo alcance. Y aunque así no fuera, lo seguro es que el ITER va a conducirnos hasta la próxima frontera de la investigación en fusión.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

MAGNETIC FUSION REACTORS. Robert W. Conn en *Fusion*, vol. 1: *Magnetic Confinement*, parte B. Dirigido por Edward Teller. Academic Press, 1981.

ITER CONCEPTUAL DESIGN. K. Tomabechi y otros en *Nuclear Fusion*, vol. 31, n.º 6, págs. 1135-1224; junio 1991.

THE ITER TOKAMAK DEVICE: ITER DOCUMENTATION SERIES, n.º 25. International Atomic Energy Agency, 1991.

PLASMA PHYSICS AND CONTROLLED FUSION RESEARCH: 1990. International Atomic Energy Agency, 1991.

Catalizadores ácidos sólidos

Se han logrado grandes avances en el diseño de estos importantes materiales industriales. Algunos de los nuevos catalizadores ácidos sólidos limitan la emisión de productos dañinos para el entorno

Sir John Meurig Thomas

Escondida en las diminutas galerías, poros y cavidades de los catalizadores ácidos sólidos yace la base de gran parte de la industria. En sus conductos y cámaras internas, estos agentes —al igual que otros catalizadores— aumentan la velocidad de las reacciones que, sin ellos, se desarrollarían muchísimo más despacio. Pero se distinguen de los demás catalizadores en el potencial de rendimiento y respeto al ambiente que estos ácidos sólidos ofrecen.

Cada año se fabrican productos por valor de más de un billón de dólares con la ayuda de catalizadores artificiales. Sin ellos nos encontraríamos con escasez de fertilizantes, medicinas, combustibles, fibras sintéticas, disolventes y surfactantes. La verdad es que los catalizadores participan en alguna fase de la fabricación del 90 % de todos los productos industriales. Debido al carácter esencial de los mismos en la petroquímica y otras industrias, los químicos y los expertos en materiales se afanan sin descanso en la búsqueda de nuevos catalizadores y en la mejora de los existentes.

Inquisición que se ha hecho apremiante con el endurecimiento, en Estados Unidos y en Europa, de la legislación industrial relativa a la protección del medio. No tardaremos en ver prohibida la emisión atmosférica de un carcinógeno, el benceno de la gasolina. Y en el paquete normativo entrarán el monóxido de carbono (tóxico), los óxidos de azufre y nitrógeno (corrosivos y reactivos), el dióxido de carbono y los hidrocarburos volátiles, que contribuyen al efecto de invernadero.

SIR JOHN MEURIG THOMAS regenta la cátedra Fullerian de química en la Institución Real de Gran Bretaña. Actual vicecanciller de la Universidad de Gales, le advino su interés por la química de superficies cuando era alumno de la misma en Swansea; se le afianzó a lo largo de su docencia en Cambridge.

En cuanto ingredientes de los principales procesos industriales, los catalizadores participan de modo determinante en la limitación o la remoción absoluta del ambiente de esos productos nocivos. Gracias a una investigación tenaz comienza a ser posible la síntesis de combustible para el transporte exento de benceno. Otros catalizadores producen componentes de las gasolinas que aumentan su grado de octanaje y, por tanto, el rendimiento del motor, a la vez que atemperan la necesidad de añadir plomo.

Lo que no impide que muchos buenos catalizadores presenten inconvenientes, incluidos los que podrían emplearse para limitar los subproductos tóxicos. Se trata, a menudo, de ácidos líquidos que son, por sí mismos, altamente tóxicos o corrosivos; pensemos, por ejemplo, en el ácido fluorhídrico. En 1989, por citar un dato, se utilizaron 44 millones de toneladas de ácido sulfúrico y 12 millones de toneladas de ácido fosfórico en la industria estadounidense, aunque no todos para catálisis. Estos ácidos corroen los tanques de almacenamiento y desecho, convirtiendo en peligrosos su transporte y manipulación. Nótese, también, que los reactivos están mezclados o disueltos en los ácidos, por lo que la separación de los productos de reacción requiere, a menudo, un proceso difícil y de elevado consumo energético.

Además de facilitar la recuperación de los productos de reacción, los catalizadores ácidos sólidos mitigan la preocupación sobre la seguridad y la peligrosidad de las emisiones a la atmósfera. Al guardar la acidez en su interior, estos sólidos se dejan manipular, y hasta tocarlos con la mano desnuda sin sufrir daño. Por no hablar de su rendimiento: los hay con una acidez 10 millones de veces mayor que la del ácido sulfúrico concentrado. Intervienen como agentes vitales de cambio en la mitad aproximada de las reacciones catalíticas que se desarrollan en la industria.

Necesitamos nuevos catalizadores ácidos sólidos que ofrezcan mejores prestaciones en los procesos industriales y no lesionen el medio. A lo largo de los últimos decenios se ha avanzado con firmeza en ese camino. Las refinadas técnicas de la química del estado sólido y de modelización por ordenador nos han permitido a algunos investigadores, el autor del artículo incluido, diseñar formas diversas de catalizadores ácidos sólidos.

Aunque los catalizadores ácidos sólidos difieren de los líquidos en su estructura, se rigen por el mismo principio de actuación. Los ácidos se caracterizan por su facultad de ceder iones hidrógeno o protones: H^+. Los ácidos fuertes ceden fácilmente grandes cantidades de estos iones. Los protones son liberados, a menudo, por grupos hidroxílicos, en los que el enlace entre el oxígeno y el hidrógeno se rompe para producir O^- y H^+. Los protones tambien pueden ser liberados por iones hidrogenados como los H_3O^+ o el $H_5O_2^+$.

En la facultad de ceder protones reside el valor catalizador de los ácidos. Cuando un reactante recibe protones de un ácido y los incorpora forma un reactivo intermedio. Este cuerpo intermedio, dotado de carga positiva, cambia de morfología y configuración. Puede ocurrir entonces uno de los dos fenómenos siguientes: que el cuerpo intermedio se limite a ceder un protón (devolviéndolo al catalizador) y forme un isómero (así se llama el que tiene la misma composición molecular que su progenitor y distinta estructura molecular) o que el cuerpo intermedio

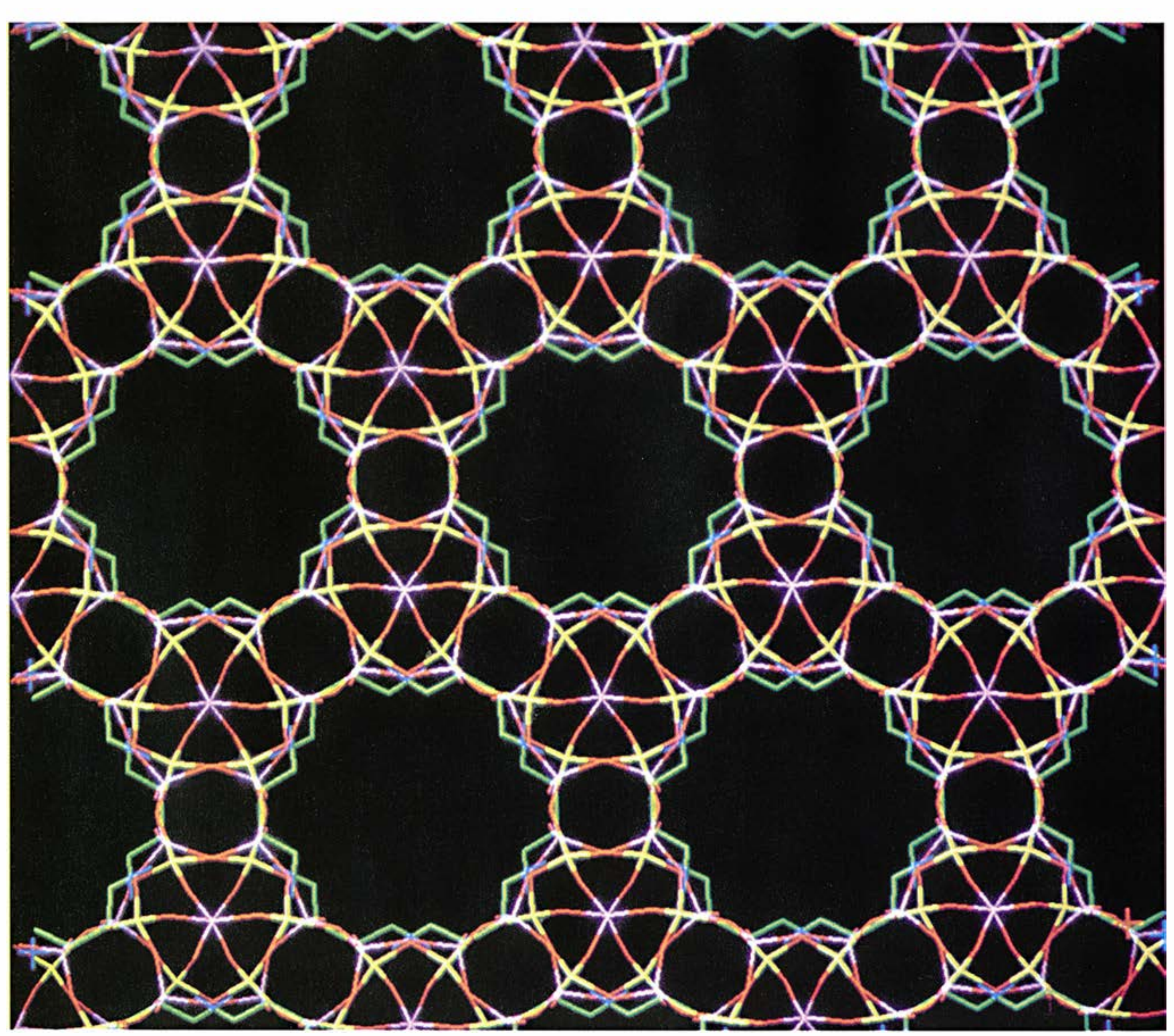
reaccione y origine una nueva molécula. El protón acaba también volviendo al catalizador.

Los geles de sílice-alúmina se contaron entre los primeros catalizadores ácidos sólidos que utilizó la industria. Catalizan el refino o "cracking" de los hidrocarburos, proceso a través del cual las moléculas complejas y voluminosas que confieren viscosidad al petróleo se convierten en moléculas más pequeñas y altamente volátiles, como las de la gasolina. Los geles de sílice-alúmina, que carecen de estructura definida, contienen muchos microporos de tamaños comprendidos entre algunos angstroms y varios cientos de angstroms. (El angstrom es la diezmillonésima de milímetro). Los microporos se recubren de protones débilmente enlazados e inductores de la actividad catalítica ácida del gel.

Ciertos rasgos de los geles de sílice-alúmina —en especial su carácter amorfo y el tamaño de sus poros, muy variable— les quitan atractivo. Estos compuestos tienden a perder su actividad durante el proceso de refino de los hidrocarburos con la formación, en sus cavidades, de grandes productos carbonatados por la polimerización de productos iniciales de la catálisis. En virtud de ello, se desarrollan reacciones secundarias no deseadas, hasta que los productos resultantes se van acumulando y taponan los poros. Al faltarles la estructura regular de los cristales, en los geles los protones se distribuyen irregularmente, dificultándose así el control preciso de la catálisis.

Mediados los años sesenta, se asistió a la sustitución generalizada de los geles de sílice-alúmina por las zeolitas, otros catalizadores ácidos sólidos más eficaces. Estas "piedras hirvientes" (del griego *zeo*, hervir, y *lithos*, piedra) son cristales altamente porosos, entrecruzados por conductos minúsculos de unos tres a siete angstroms de diámetro. Las zeolitas se hallan libres de los inconvenientes de los geles de sílice-alúmina. Gracias a esa exigüidad de los poros internos, estas estructuras cristalinas no dejan margen para la formación de macromoléculas carbonatadas que saturen el catalizador.

Aunque varía con la arquitectura atómica de la zeolita de que estemos hablando, los poros podrían constituir hasta el 50 % del volumen. La inmensa mayoría de los átomos que integran su armazón estructural son



1. CAPAS POROSAS de aluminofosfatos como las representadas se adaptarán para convertirlas en catalizadores ácidos sólidos, siempre que introduzcamos átomos de hidrógeno para transformar en ácidos los microporos de estas capas. Los colores indican los enlaces entre los átomos: aluminio (*amarillo*), fósforo (*morado*), oxígeno (*rojo*), carbono (*verde*) y nitrógeno (*azul*).

accesibles a cualquier molécula que, amparada en su pequeñez, penetre en la red interna de conductos. En otras palabras, la mayoría de los átomos de una zeolita son átomos superficiales. Si extendiéramos una cucharada de catalizador ácido de zeolita, de una molécula de espesor, cubriríamos un campo de fútbol.

Amén de ofrecer una extensa superficie eficaz, los protones desprendibles están rodeados por un entorno regular y bien definido. Los protones, o regiones activas, muestran una distribución uniforme por la estructura interna. Comparada con la dificultad que entraña determinar el número y la naturaleza de las posiciones activas en muchos otros tipos de catalizadores sólidos, esa determinación resulta llanísima en las zeolitas. De algunas sabemos, por ejemplo, que tapizan sus poros con 10^{19} posiciones activas por gramo.

La comprobación de que, en las zeolitas, se llegaba al mismo resultado con la aplicación de la física de superficies que partiendo del estado sólido, aceleró nuestro conocimiento de esos materiales. En 1980, mis alumnos de la Universidad de Cambridge y yo emprendimos distintas incursiones en química del estado sólido que han sacado a la luz muchos datos sobre un nuevo conjunto de catalizadores zeolíticos. En colaboración con Anthony K. Cheetham, de la Universidad de Oxford, recurrimos al método de dispersión neutrónica para acotar la naturaleza de la posición del protón móvil en el catalizador del refino de hidrocarburos zeolita Y de intercambio iónico de lantano, o La Y.

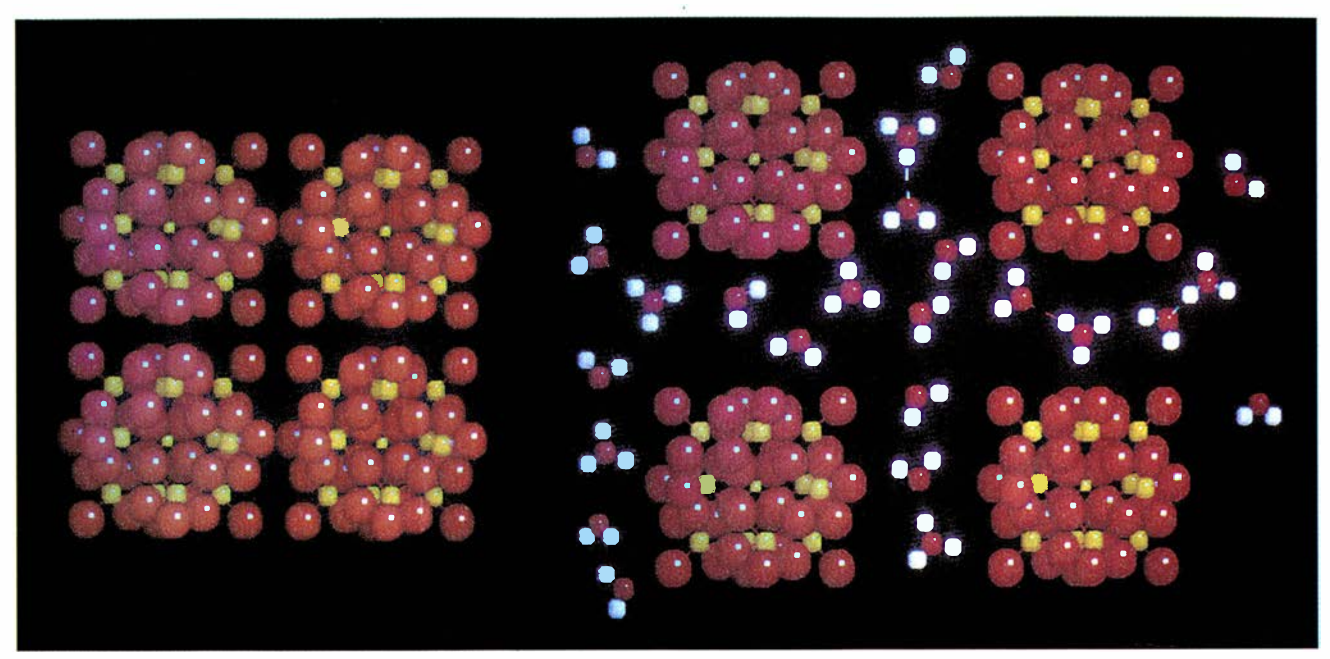
Lo mismo que en el dominio de los catalizadores enzimáticos, en el de los inorgánicos comenzamos a ver claro cuando conocemos la estructura pormenorizada de las posiciones activas. Es condición imprescindible para idear nuevos catalizadores. Los protones se perciben mejor cuando los exponemos a haces de neutrones, por la sencilla razón de que aquéllos dispersan a éstos con intensidad mayor que los rayos X. Pero también nos hemos servido de la difracción de rayos X, espectroscopía de resonancia magnética, microscopía de alta resolución y muchas otras técnicas que nos descifraran los secretos de la composición y el esqueleto o armazón estructural de estos catalizadores.

Entre las cualidades principales de las zeolitas, destaca su capacidad de catálisis con selección de forma, como han puesto de manifiesto en parte las técnicas de tratamiento de imagen de microscopía electrónica. Este principio, cuyo estudio fue iniciado a principios de los años sesenta por el grupo de Paul B. Weisz, de la empresa Mobil, es bastante sencillo. Durante el desarrollo de las reacciones en el seno de los poros de una zeolita dada, se producen sólo las moléculas que encajan en sus conductos y pueden moverse a lo largo de los mismos. Dicho de otro modo, la morfología de las cavidades controla la forma del producto de una reacción catalítica.

En bastantes reacciones de interés industrial se emplea ZSM-5, catalizador ácido sólido, que opera de acuer-

Ejemplos de reacciones que utilizan catalizadores ácidos sólidos

PROCESO	EJEMPLO
REFINO DE HIDROCARBUROS Se convierten macromoléculas en una serie de moléculas volátiles.	$n(C_{12}H_{18})$ (PETROLEO) —CATALIZADOR La Y→ $n(C_2H_4)$ + $n(C_6H_6)$ + $n(C_4H_8)$ (ETILENO, BENCENO, BUTENO)
REORDENACION DE COMPUESTOS AROMATICOS Dos moléculas de un compuesto se reorganizan catalíticamente en dos compuestos distintos.	$2(C_6H_5CH_3)$ (DOS TOLUENOS) —ZSM-5→ C_6H_6 + C_8H_{10} (BENCENO, XILENO)
ALQUILACION Se añade un fragmento de hidrocarburo a un compuesto orgánico mediante la utilización de un alqueno (etileno o 2-metilpropeno). Se considera proceso inverso al del refino.	C_6H_6 + C_2H_4 (BENCENO, ETILENO) —ZSM-5→ $C_6H_5C_2H_5$ (ETILBENCENO (PRECURSOR DEL ESTIRENO)) $CH_2C(CH_3)_2$ + $(CH_3)_3CH$ (2-METILPROPENO, ISOBUTANO) —ARCILLA ACIDA→ $(CH_3)_3CCH_2CH(CH_3)_2$ (ISOCTANO)
CONVERSION DEL METANOL EN GASOLINA El abundante metanol se transforma fácilmente en combustible.	$n(CH_3OH)$ (METANOL) —ZSM-5→ $n(CH_2)$ + $n(H_2O)$ (GASOLINA, AGUA)
SINTESIS DEL METIL TERBUTIL ETER (MTBE) Este valioso componente de la gasolina, que aumenta el octanaje y, por ende, el rendimiento del motor, se forma mediante catálisis ácida.	CH_3OH + $CH_2C(CH_3)_2$ (METANOL, 2-METILPROPENO) —ARCILLA ACIDA→ $CH_3OC(CH_3)_3$ (MTBE)
FORMACION DE ACETATO ETILICO Este importante disolvente y componente de perfumes y sabores puede fabricarse a partir del etileno y el ácido acético.	C_2H_4 + CH_3COOH (ETILENO, ACIDO ACETICO) —ARCILLA ACIDA→ $CH_3COOC_2H_5$ (ETILACETATO)



2. CUATRO IONES DE KEGGIN (*izquierda*), formados por un átomo central de silicio o fósforo (*amarillo pequeño*), rodeado por oxígeno (*rojo*) y molibdeno o tungsteno (*amarillo grande*). Las estructuras constituidas por iones de Keggin absorben moléculas polares (*rojo y blanco*) que tienen una ligera carga eléctrica, para transformarse en cuasilíquidos hinchados (*derecha*).

do con el principio de selección de forma; nos ofrece un buen ejemplo de ello la síntesis del *para*-xileno, precursor del nylon. La combinación de moléculas de tolueno con alcohol metílico en un catalizador ZSM-5 rinde sólo moléculas en forma de bastoncitos de *para*-xileno —las de importancia comercial—, pero no produce moléculas de *orto*-xyleno, en bumerang y carentes de interés. Este catalizador rinde también etilbenceno cuando se añade etileno al benceno —sin tener que recurrir al tricloruro de aluminio, un catalizador de propiedades químicas enojosas y nocivo para el ambiente. El etilbenceno es el precursor del estireno.

El equipo de David R. Corbin, de Du Pont, ha generalizado con cierta dosis de ingenio la estrategia de la catálisis con selección de forma sirviéndose de Rho, una zeolita ácida. El catalizador Rho, que había sido ya sintetizado por Richard Barrer, del Colegio Imperial de Londres, permite la producción de metilaminas a partir del metanol y amoniaco. Los catalizadores ácidos sólidos corrientes, como el gel de sílice-alúmina, sintetizan tres tipos de metilaminas de volumen creciente —llamémoslas *a, b* y *c*— en las proporciones predichas termodinámicamente 15:23:62. Las metilaminas aparecen en esa proporción porque los poros del catalizador permiten el libre movimiento de cada producto.

Ahora bien, el tamaño de poro del catalizador ácido Rho es pequeño, lo que significa que de la zeolita sale muy poca cantidad de la metilamina de la clase más abultada (*c* o trimetilamina). La proporción del producto pasa a ser 14:86:04. La dimetilamina, o *b*, constituye una pieza importante en la fabricación de resinas sintéticas, fibras, tintes y drogas. Evidentemente es el producto favorecido por la reacción máxima. Aprovechando las cavidades de Rho podemos sintetizar productos de mayor interés.

Su extensa superficie y la abundancia de posiciones activas convierten a las zeolitas en catalizadores eficaces. Y aunque las zeolitas proporcionan una red de conductos interpenetrantes más o menos tridimensional, algunos sólidos inorgánicos permiten el acceso bidimensional a su interior, lo que supone que, en determinadas reacciones, los catalizadores ácidos sólidos bidimensionales alcancen casi la eficacia de las zeolitas.

Cabe, en efecto, diseñar y manipular ácidos sólidos de gran superficie, distintos de las zeolitas, para crear microentornos que conduzcan a la catálisis controlada. El trabajo que inicié con mi grupo, hace ya veinte años, en el Colegio Universitario de Gales en Aberystwyth, nos ha llevado al desarrollo de una nueva serie de catalizadores ácidos sólidos: las arcillas modificadas.

Empecé a investigar sobre las propiedades catalíticas de los ácidos sólidos casi por azar. Por razones profesionales, mi especialidad es la química física, me atraía la dinámica de los compuestos en forma de bocadillo que se originan cuando se incorporan, o se intercalan, moléculas en los espacios existentes entre las distintas capas de la arcilla. Este abundante material es también uno de los más porosos y benignos del planeta. Las arcillas están compuestas por capas de átomos que casi siempre son silicio, oxígeno, aluminio o magnesio en forma cristalina. En la mayoría de las arcillas, las capas poseen carga negativa y se mantienen trabadas mediante las cargas positivas de los iones de sodio y calcio, que residen en los espacios interlaminares entre las capas.

Nos atraía, sobre todo, desentrañar el fenómeno de la intercalación, así como definir mejor la naturaleza de las arcillas con el recurso a las nuevas técnicas de rayos-X, neutrones y electrones. En colaboración con Howard Purnell y James A. Ballantine, del Colegio Universitario de Swansea, mi equipo se apuntó dos modestos hallazgos que más tarde demostrarían su utilidad inestimable en la formación de los catalizadores ácidos sólidos.

Descubrimos, en primer lugar, cuán fácil era sustituir iones de sodio, calcio u otras tierras alcalinas por protones hidratados de la forma H_3O^+. Estudiamos este proceso en la montmorillonita, arcilla compuesta por capas de alumino-silicato. La sustitución de iones antes mencionada no atenta contra la integridad del





3. POROS DE LA ZEOLITA ZSM-5, que mide 5,5 angstroms de diámetro. Son las manchas blancas regulares de la micrografía (*izquierda inferior*). En el modelo de un solo poro (*arriba a la izquierda*) se observa el ordenamiento atómico del silicio (*amarillo*) y oxígeno (*rojo*). Si se sustituye un átomo de silicio por otro de aluminio (*azul*), se enlaza un átomo de hidrógeno (*blanco*) para mantener la neutralidad eléctrica de la estructura (*centro*). Este protón dota al poro de su capacidad catalítica. Cuando el metanol incorpora el protón (*derecha*), se transforma en un reactivo intermedio.

material. Al cambiar los iones en los espacios interlaminares nos limitamos a transformar la arcilla de sal en ácido.

Observamos, en segundo lugar, cuán fácilmente esas arcillas catalizaban ciertas reacciones. Por ejemplo, los alquenos como el hexeno, un hidrocarburo insaturado, pudieron combinarse con agua en los espacios interlaminares para producir dihexiléteres, que son importantes disolventes. Los protones alojados en los espacios interlaminares desempeñaron bien su actividad catalítica. No tardamos en advertir que las arcillas ácidas que habíamos creado catalizaban reacciones de interés comercial, algunas de las cuales han adquirido ahora importancia ambiental.

Nos sorprendió, sobre todo, ver con qué facilidad nuestra arcilla ácida catalizaba la formación del acetato de etilo, disolvente industrial e ingrediente de perfumes y sabores artificiales. Cada año se producen más de 100.000 toneladas de este líquido incoloro y fragante, a través de dos etapas catalíticas distintas. La primera utiliza ácido sulfúrico concentrado como catalizador para hidratar el etileno en etanol. Durante la segunda etapa se emplea ácido sulfúrico para acelerar la unión del etanol con ácido acético que rinda agua y acetato de etilo. Pero estas etapas distan de constituir ningún ideal: amén de servirse de un ácido líquido corrosivo, el agua eliminada durante el segundo proceso diluye el ácido y lo rebaja tanto, que demanda la aportación de grandes cantidades del mismo.

Nuestra arcilla ácida, sin embargo, puede sintetizar acetato de etilo en una etapa, sin tener que recurrir al ácido sulfúrico líquido, muy potente. El catalizador ácido sólido elude también el problema de la dilución, ya que no se produce agua cuando combinamos etileno con ácido acético intercalado para formar acetato de etilo.

Mas no todas las arcillas son buenos catalizadores. Algunas tienen impurezas que las inestabilizan. Las procedentes de determinados horizontes geológicos —la montmorillonita de Wyoming, por ejemplo— presenta pequeñas cantidades de impurezas de metales de transición en sus capas. A pesar de tan mínima proporción, estas impurezas inducen reacciones secundarias que entorpecen la reacción principal que se pretende catalizar.

Las arcillas libres de tales impurezas son, por tanto, valiosos catalizadores, capaces de limitar de manera notable la creación de compuestos nocivos para el ambiente. Uno de los aditivos para la gasolina cuya producción está creciendo más rápidamente es el metil-terbutil-éter (MTBE), que aumenta el índice de octano en la nueva generación de gasolinas sin plomo. El MTBE rebaja también la presión de vapor de la gasolina, limitándose así la emisión de gases que contribuyen al efecto de invernadero cuando el motor se pone al ralentí. Y al aportar oxígeno al combustible, facilita una combustión más completa. Gracias a ello, el combustible libera menos monóxido de carbono y otros contaminantes.

Nuestra montmorillonita ácida, libre de impurezas de metales de transición, se muestra eficaz en la catálisis de MTBE a partir de alcohol metílico y 2-metilpropeno a temperaturas inferiores a 100 grados centígrados. En ese proceso, los catalizadores habituales son las resinas sulfonadas, que contienen azufre, un contaminante del suelo cuando se desecha el catalizador. Por contra, el catalizador arcilloso convive en armonía con el entorno y puede aprovecharse sin temor para funciones de relleno en escombreras.

El trabajo reciente de los japoneses sobre los heteropoliácidos, una clase enteramente distinta de ácidos sólidos, arranca de un descubrimiento realizado en 1834 por el químico sueco Jöns Jakob Berzelius, quien acuñó la palabra “catalizador”. La estructura del nuevo tipo de ácido hallado por Berzelius la determinó, cien años después, el cristalógrafo de rayos-X J.D.F. Keggin: estos compuestos ricos en oxígeno portan un átomo central —fósforo, arsénico, silicio o germanio— y átomos de molibdeno o tungsteno, así como altas concentraciones de protones débilmente enlazados. Desde entonces, los heteropoliácidos se conocerían por sistemas iónicos de Keggin.

Los heteropoliácidos, lo mismo que las arcillas, se hinchan al capturar moléculas de agua y moléculas orgánicas. Estos compuestos pueden incorporar grandes cantidades de agua y un amplio rango de moléculas polares, que son las que carecen de carga eléctrica total y tienen, sin embargo, un extremo ligeramente negativo y el opuesto positivo.

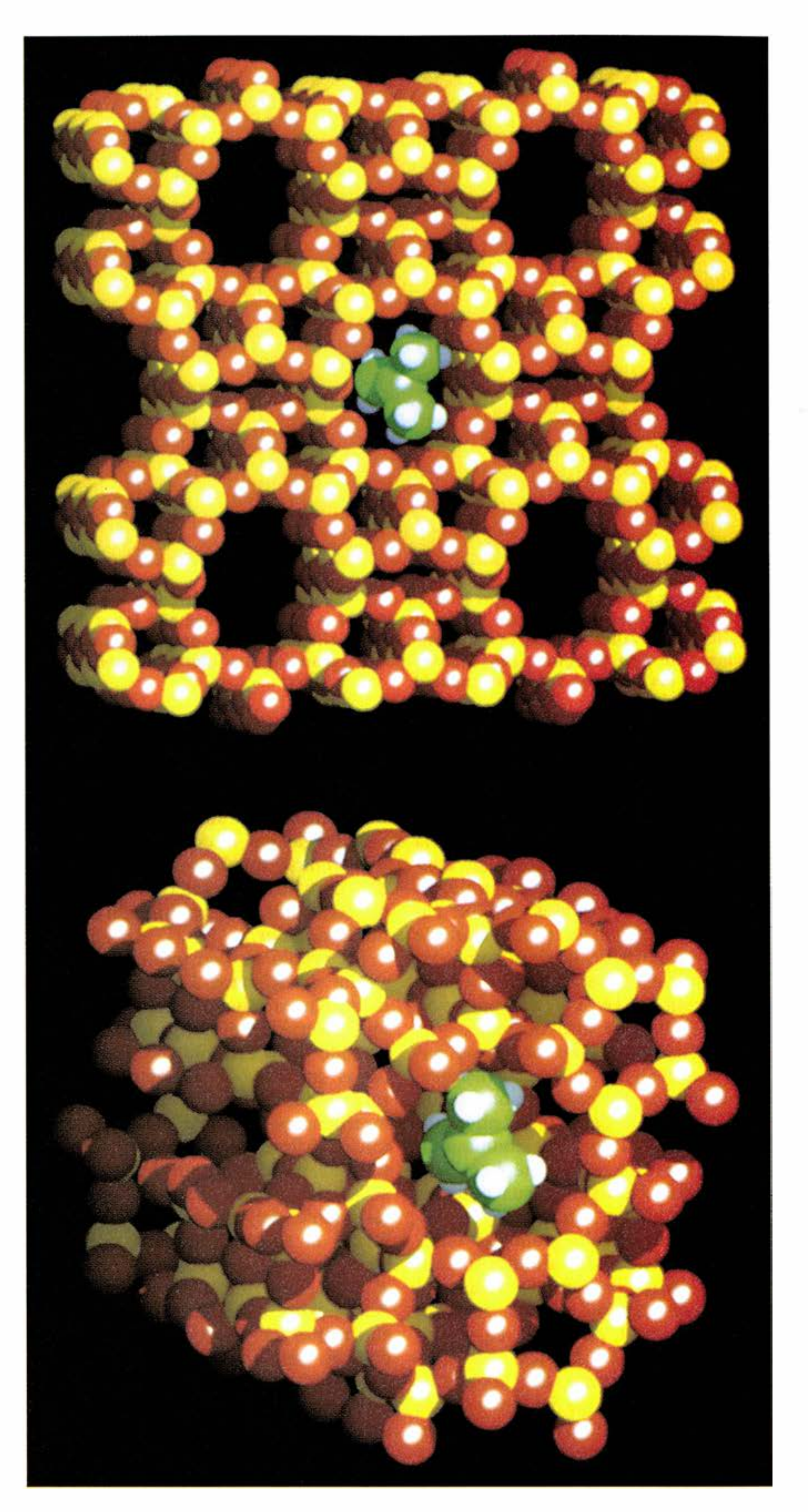
El sólido hinchado resultante es un cuasilíquido donde los protones hidratados y otras moléculas incorporadas se desenvuelven con movilidad, la misma que tienen en los espacios interlaminares de otros catalizadores ácidos sólidos. Los reactantes hallan acceso a muchos protones en un sistema tan hinchado gracias a la extensión de su superficie, igual que sucedía en el caso de los catalizadores tridimensionales como las zeolitas. Los mecanismos moleculares de tal proceso de hinchado o esponjado siguen envueltos en el misterio.

Yoshio Ino y Makoto Misono y sus colegas, del Instituto Politécnico y de la Universidad de Tokyo, han puesto de relieve la capacidad catalítica de los sistemas iónicos sólidos de Keggin, convirtiendo alquenos (etileno y propileno) en alcoholes (alcohol etílico e isopropanol), de fuerte demanda. En esta reacción se utilizan habitualmente líquidos corrosivos, incluido el ácido sulfúrico concentrado.

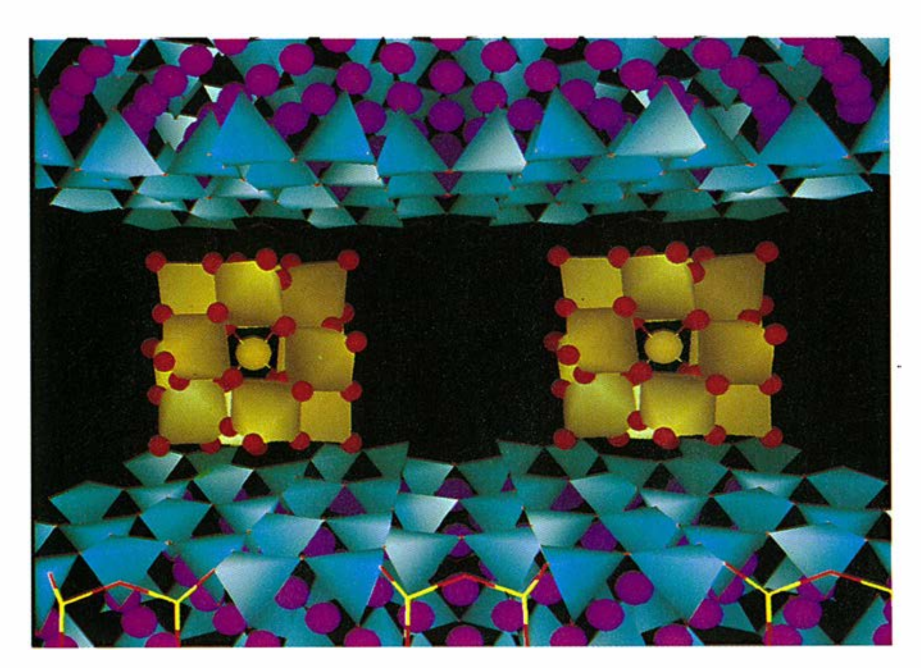
Aunque los catalizadores ácidos iónicos de Keegin carecen de la selectividad de forma de las zeolitas, se ha logrado insertar, en los espacios interlaminares de las arcillas, análogos de iones de Keggin cargados positivamente y ricos en aluminio. A la investigación en las arcillas columnares resultantes, abierta por Barrer, se ha dedicado tenazmente D. E. W. Vaughn, de la compañía Exxon.

Las arcillas columnares de interés catalítico ofrecen dos ventajas. En primer lugar, este proceso hace que el espacio interlaminar de la arcilla originaria sea bidimensional; en segundo lugar, confiere estabilidad térmica a la arcilla impidiendo que las capas se desmoronen durante el tratamiento térmico. Pero no parece que las arcillas columnares resistan las duras condiciones requeridas para el refino catalítico del petróleo. Sí son muy prometedoras, por contra, como catalizadores ácidos, buenos y limpios, para la producción de ésteres y éteres, sustancias que se reclaman en demanda creciente para múltiples procesos industriales.

Se ha avanzado con firmeza en el diseño de catalizadores ácidos viables que sirvan de medios alternativos a los catalizadores líquidos tóxicos y aquellos cuyas prestaciones son mejorables. Sin olvidar que sigue pendiente la exigencia de obtener combustibles cada vez más limpios. Conforme bajen las reservas habrá que ir aprovechando los hidrocarburos del "fondo del barril" para la producción de combustibles. Ese



4. DOS ACIDOS SOLIDOS CATALIZADORES: Theta-1 (*arriba*) y ZSM-5 (*abajo*), cuyos poros son similares en tamaño al diámetro de dos isómeros del buteno, el 2-metilpropeno (*verde y blanco*), de interés comercial, y el 1-buteno (*no representado*). Merced a la forma de los poros, ambos catalizadores isomerizan el 1-buteno en 2-metilpropeno. Sin embargo, se pueden formar también algunos subproductos indeseables en el ZSM-5, reduciendo su efectividad en este proceso respecto al Theta-1.



5. ARCILLA COLUMNAR, representada aquí en un modelo poliédrico. Se trata de una forma de catalizador ácido sólido que combina arcillas ácidas con iones de tipo Keggin. Las arcillas laminares se componen de silicio (*azul*) y magnesio (*morado*). Los iones de tipo Keggin —constituidos por oxígeno (*rojo*) y aluminio (*amarillo*)— residen en los espacios entre las capas.

petróleo más pesado es también más rico en contaminantes y, por tanto, precisa un refino catalítico que evite la emisión de subproductos nitrogenados o ricos en azufre. Además, la gasolina de automóvil no debe contener benceno. Y lo más apremiante: hay que dar con ácidos sólidos capaces de catalizar la producción de isoctano a partir de la alquilación del butano por el 2-metilpropeno, que es la reacción clave en la producción de la gasolina de alto octanaje.

Para conseguir esos objetivos podemos considerar varias estrategias. Por ejemplo, la explotación de la amplia gama de estructuras microporosas compuestas por los aluminofosfatos. Hace diez años, Stephen Wilson y Edith Flanigen y sus colegas, de Union Carbide, informaron del hallazgo de un nutrido grupo de tamices moleculares de aluminofosfato (ALPO). Algunos tamices tenían el armazón estructural de las zeolitas; otros eran muy distintos. El grupo Carbide, Mark E. Davies, del Caltech, Joseph V. Smith, de Chicago, y Charis Theocharis, de la Universidad Brunel, con sus equipos respectivos, descubrieron que muchos iones metálicos (cobalto, cinc, magnesio y manganeso) podían reemplazar a los iones de aluminio. Esta sustitución condujo a la creación de varios ácidos sólidos.

El grado de acidez del sólido resultante depende, en parte, de la estructura del tamiz molecular y, en parte, de la naturaleza del ion metálico. En general, los ALPO en los que el aluminio se ha sustituido parcialmente por magnesio tienden a ser más ácidos que sus correspondientes de manganeso o cobalto. Pero debe investigarse mucho más antes de poder certificar la actividad catalítica de estos compuestos inorgánicos tridimensionales.

Mi propio trabajo, realizado con la ayuda de Richard Jones y asociado al de Ruren Xu y Jiesheng Chen, de la Universidad de Jilin, acabó descubriendo una estructura formada por capas porosas de aluminofosfatos e intermedia entre las zeolitas tridimensionales o las ALPO y las cerámicas bidimensionales. Aunque no se trata en puridad de un ácido, debería ser posible manipular la estructura fascinante del compuesto hasta conferirle la acidez apropiada.

Otra estrategia a seguir para crear ácidos sólidos es la de adaptar sutilmente la estructura y propiedades de las zeolitas existentes, sirviéndose de la guía de la química computacional. Se adivina muy prometedora la síntesis de estructuras de zeolita conocidas con una proporción superior de silicio respecto al contenido de aluminio; en ese sentido, los catalizadores de refino del petróleo podrían dotarse de una acidez bastante más alta —aunque el número de protones desprendidos disminuya— al incrementar, del 20 al 30 por ciento, la proporción de silicio respecto del aluminio. Se ignora la razón de este comportamiento, pero es palmario que existe una proporción óptima que eleva al máximo la acidez intrínseca.

Usando catalizadores de zeolita con grandes cantidades de silicio, Ian E. Maxwell, Wim Stork y Arend Hoek, de la compañía Shell, rebajaron hasta 250 veces el contenido de azufre de algunos productos de la gasolina. Nuevos catalizadores de Shell, que incorporan partículas de níquel y tungsteno, han facilitado también el refino de los hidrocarburos y la conversión del benceno y otros compuestos aromáticos en sus formas no cancerígenas. Con estrategias parecidas, el equipo de Shell han conseguido gasolinas de alto octanaje, a partir de la hidroisomerización de una mezcla de pentano-hexano, utilizando mordenita, una zeolita que contiene pequeñas cantidades de platino.

El descubrimiento de esa variedad de catalizadores ácidos sólidos fue resultado de una combinación de paciencia, pasión y casualidad en los laboratorios de química. Les ha llegado el turno a los métodos de computación racionales, que están adquiriendo interés creciente en la investigación de nuevos catalizadores. Se trata de una de las líneas más activas del campo de los catalizadores ácidos sólidos.

Los que mejor se prestan al análisis matemático son los catalizadores de la variedad heterogénea uniforme: aquella en que los protones arrancables se distribuyen por todo el sólido de manera uniforme y accesible. Los sistemas iterativos no encierran ninguna dificultad para los ordenadores. Por su regularidad, los catalizadores en cuestión pueden someterse a cálculos de dinámica molecular o mecánica cuántica. Menos accesibles al tratamiento informático son los catalizadores no uniformes (geles de sílice) o los catalizadores multifase; constituidos estos últimos por metales finamente divididos en un bastidor de alúmina, convierten el gas de agua ("syngas", una mezcla de monóxido de carbono e hidrógeno) en hidrocarburos.

Nos propusimos en mi laboratorio crear un catalizador ácido zeolítico para la producción de MTBE, componente de la gasolina al que me he referido antes y formado por 2-metilpropeno, uno de los cuatro isómeros del buteno. Abunda uno de los isómeros, el 1-buteno, porque se desprende en el refino del petróleo, pero escasean el 2-metilpropeno y los dos isómeros restantes. Ante ese hecho, nos planteamos la búsqueda

de un catalizador que rindiera 2-metilpropeno a partir de 1-buteno.

Para el tratamiento informático, seleccioné, con Clive M Freeman y C. Richard A. Catlow, dos ácidos sólidos zeolíticos: ZSM-5 y Theta-1. (El segundo se descubrió hace ocho años en los laboratorios de British Petroleum.) Los escogimos por el diámetro de sus conductos, unos 5,5 angstroms, el diámetro de los dos isómeros que nos importan. La diferencia entre las dos zeolitas descansa en la estructura de los conductos; en la ZSM-5 los canales se intersecan y originan un conjunto regular de cavidades mayores; en Theta-1, los conductos no se cruzan, ni hay cavidades adicionales.

Comparamos la movilidad y la energía de enlace de los cuatro isómeros en el interior de los dos sólidos microporosos mediante una mezcla de métodos de dinámica molecular y Monte Carlo. Descubrimos que, en los dos catalizadores, era mucho más fácil el desprendimiento de 2-metilpropeno que el de cualquiera de los tres isómeros restantes. A tenor del desarrollo de los cálculos espaciales cabía esperar la presencia de subproductos indeseables, esto es, dímeros innecesarios (pares enlazados de isómeros) en las cavidades mayores donde se intersecaban los canales. Lo que nos movió a predecir que el Theta-1 sería superior al ZSM-5 para la isomerización del 1-buteno en 2-metilpropeno. Acertamos en la hipótesis.

El diseño y el desarrollo de catalizadores serán nuestro reto durante mucho tiempo. El advenimiento de catalizadores ácidos sólidos mejores nos asegurará un futuro más limpio y rentable con el horizonte puesto en una industria sin residuos.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

COMPUTING THE LOCATION AND ENERGETICS OF ORGANIC MOLECULES IN MICROPOROUS ADSORBENTS AND CATALYSTS: A HYBRID APPROACH APPLIED TO ISOMERIC BUTENES IN A MODEL ZEOLITE. Clive M. Freeman, Richard A. Catlow, John M. Thomas y Stephan Brode en *Chemical Physics Letters*, vol. 186. n.º 2-3, págs. 137-142; 8 de noviembre de 1991.

NEW AND IMPROVED CATALYTIC PROCESSES FOR CLEAN FUELS. I. E. Maxwell y J. E. Naber en *Catalysis Letters*, vol. 12, págs. 105-116; abril de 1992.

PERSPECTIVES IN CATALYSIS: A "CHEMISTRY FOR THE 21ST CENTURY" MONOGRAPH. Dirigido por John M. Thomas y Kirill I. Zamaraev. Blackwell Scientific Publications/International Union of Pure and Applied Chemistry, 1992.

Miembros fantasma

Personas que han perdido un brazo o una pierna perciben a menudo, como si aún siguieran teniéndolo, ese miembro que en realidad les falta. Pueden también sentir terribles dolores en ciertas partes del "miembro fantasma"

Ronald Melzack

En 1866 S. Weir Mitchell, el más eminente neurólogo norteamericano de su tiempo, publicó su primer informe sobre miembros fantasma. No escogió una revista científica, sino el *Atlantic Monthly*. Se escudó, además, en un breve relato anónimo, que tituló "El caso de George Dedlow", protagonista al que le amputan un brazo durante la Guerra Civil. Cuando se despierta en el hospital, no sabe que han tenido que amputarle también las dos piernas.

"Sentí de pronto un fuerte calambre en la pierna izquierda. Traté de llegar hasta ella... con mi único brazo, pero, encontrándome demasiado débil, llamé a un enfermero. 'Por favor, hágame unas fricciones en la pantorrilla izquierda'."

"'¿En la pantorrilla... ¡Si no tienes ninguna, compañero! ¡Te las tuvieron que cortar!'"

Algunos aventuran que Mitchell recurrió al *Atlantic* para comprobar la reacción de sus colegas ante la hipótesis de los miembros fantasma. Temía que no iban a creerse que, tras la amputación, los miembros eliminados pudieran seguirse sintiendo como brazos y piernas reales.

La verdad es que el fenómeno de los miembros fantasma está bastante extendido. Y lo está también el sufrir un dolor terrible en esos apéndices invisibles. Pero todavía no se sabe bien la causa de tan fantasmales sensaciones, ni la del sufrimiento que producen. Con mis colaboradores hemos avanzado esbozos de explicación que están removiendo las aguas de la investigación sobre la terapia de unos dolores a menudo inaguantables. Esa gavilla de ideas abordan cuestiones sobre supuestos básicos de la psicología y la neurología contemporáneas.

El rasgo más sorprendente de cuantos definen a los miembros fantasma reside en su carácter de realidad para el amputado. Sus vívidas cualidades sensibles y su precisa localización espacial —sobre todo al principio— confieren a esas extremidades tal verismo que el paciente trata de bajar de la cama apoyándose en "su" pie fantasma o de tomar y alzar una taza con "su" mano fantasma. De hecho, el miembro fantasma puede parecer más auténtico y vivo que el realmente existente, sobre todo al tropezar con algo.

En la mayoría de los casos, un brazo fantasma cuelga rígido al costado de la persona cuando ésta se halla de pie o sentada, pero se mueve en perfecta coordinación con los otros miembros al andar; o sea que se comporta como un miembro normal. Semejantemente, la pierna fantasma se dobla como es debido al sentarse su poseedor, se estira cuando éste se acuesta y vuelve a estar vertical en cuanto el sujeto se yergue.

A veces, empero, la persona amputada está convencida de que tiene el miembro, sólo que en posición inusual. Un hombre sentía que su brazo fantasma se extendía rígido desde el hombro, en ángulo recto con el resto del cuerpo; y así, se giraba hacia un lado al pasar por las puertas, para no tropezar con la pared. Otro individuo, cuyo brazo fantasma se le retorcía por detrás del tórax, sólo podía dormir boca abajo o de costado, porque el fantasma, interponiéndose, le impedía descansar en posición supina.

El misterioso realismo de los miembros fantasma es reforzado con frecuencia por sensaciones que imitan las que se solían tener en el miembro antes de la amputación. Por ejemplo, un sujeto puede sentir el dolor de una úlcera o de un juanete que había padecido en un pie, o incluso un fuerte hormigueo que había tenido en un dedo. No se limitan a recordar sensaciones pasadas, sino que las sienten con toda la intensidad y con el detalle de una experiencia en curso, actualísima. El realismo del fantasma aumenta también cuando se lleva un brazo o una pierna artificial; entonces el fantasma suele llenar la prótesis como una mano se enfunda un guante.

La ilusión de realidad es reforzada asimismo por la amplia gama de sensaciones que un miembro fantasma puede experimentar. Son comunes las de presión, calor, frío y muy diversas clases de dolor. Un miembro fantasma puede hacer sentir humedad (como cuando se advierte que una pierna artificial se está metiendo en un charco). O puede picar, incluso con una comezón molestísima, aunque rascando en la aparente localización del prurito se llegue, a veces, a obtener alivio. Hay quienes pueden sentir como si el miembro fantasma les hiciera cosquillas o se les pusiera sudoroso o con hormigueo.

Naturalmente, de todas las sensaciones en miembros fantasma, la de dolor, que sufren no menos del 70 por ciento de los amputados, es la más temible y preocupante. Suele describírsela como de quemazón, de calambres o de punzadas; varía desde ocasional y suave hasta continua y muy fuerte. De ordinario comienza poco después de la amputación, pero a veces aparece semanas, meses o años más tarde. Es como si se tuviera, se quejan, una mano agarrotada,

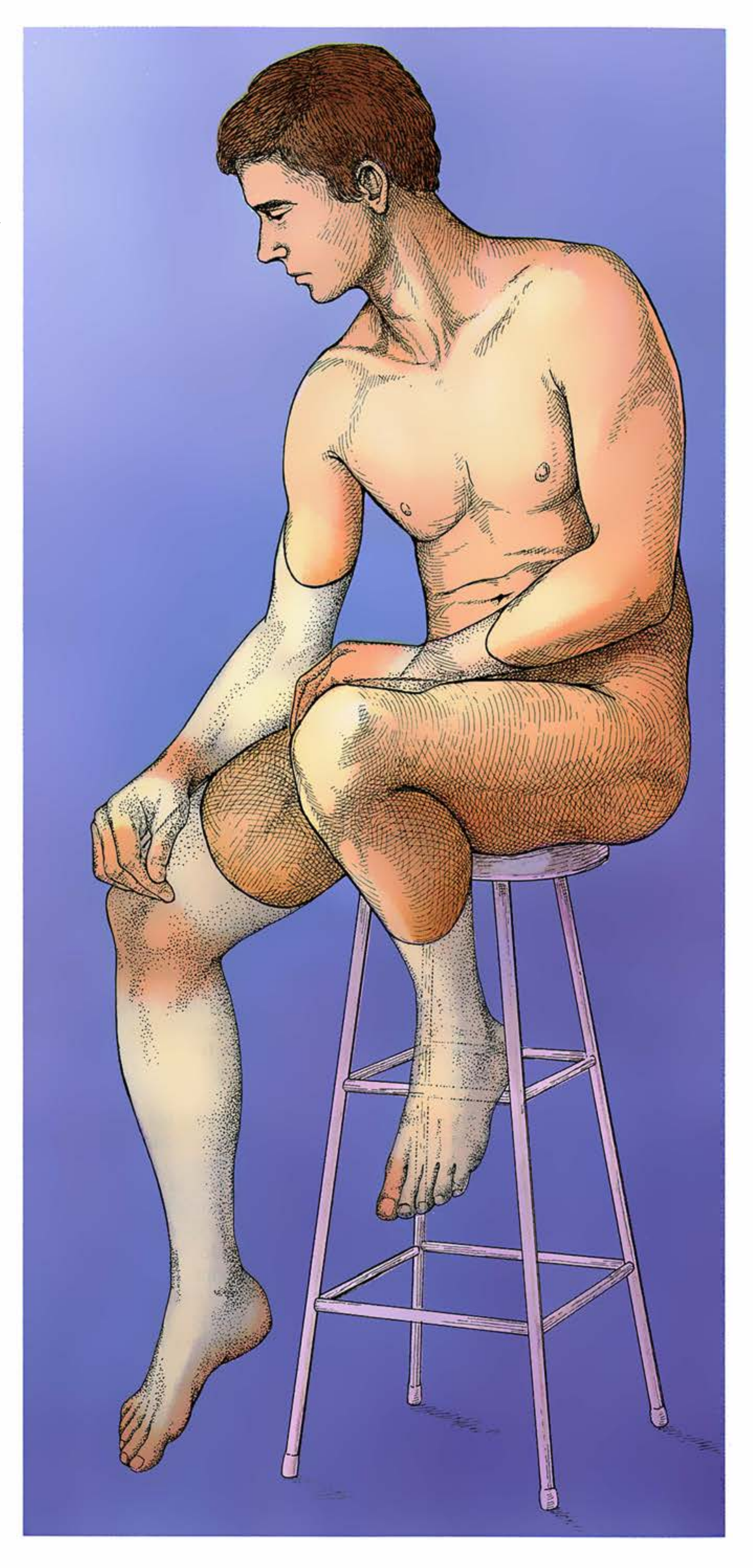
RONALD MELZACK regenta la cátedra E. P. Taylor de psicología de la Universidad McGill y dirige las investigaciones sobre el dolor en el Hospital General de Montreal, a cuya neurofisiología ha dedicado casi cuarenta años. Se doctoró por la McGill en 1954. Cinco años después, firmó contrato con el Instituto de Tecnología de Massachusetts. Allí inició con Patrick D. Wall los debates que le llevarían a publicar, en 1965, su hoy famosa teoría del "control de puerta" sobre el dolor. Volvió a McGill en 1963.

con los dedos incurvados sobre el pulgar y clavándose en la palma, de modo que se siente el miembro entero inútil y dolorido. Respecto a la pierna, el malestar se parece al calambre de pantorrilla. Muchos pacientes aseguran que sienten como que les están quemando los dedos del pie con un atizador al rojo vivo.

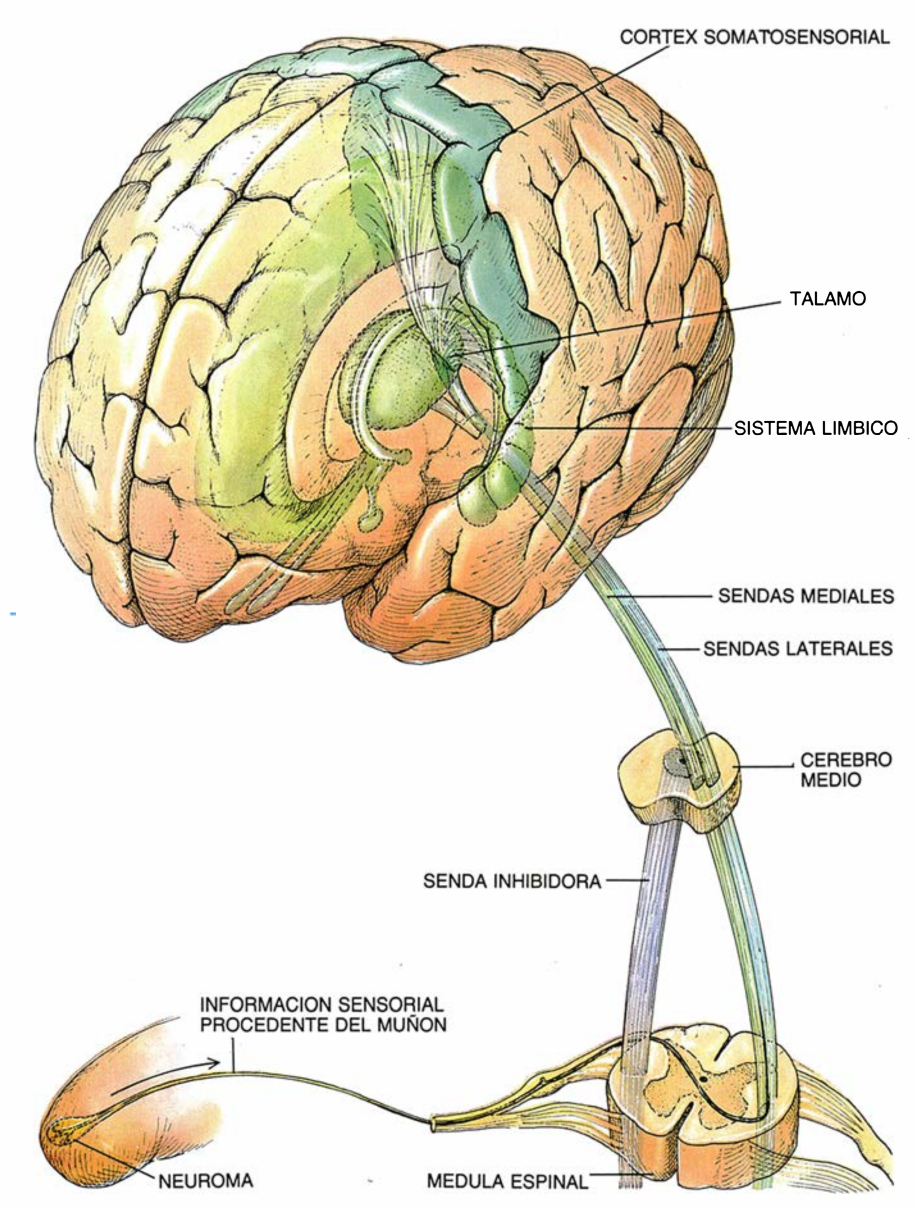
Un último rasgo notable de los miembros fantasma, que refuerza todavía más la sensación de su realismo, es que se los experimenta como parte del propio sujeto. O sea, que los pacientes los perciben como partes integrantes de su cuerpo. Del pie fantasma no sólo se afirma su realidad, sino también su pertenencia indiscutible a la persona que lo está sintiendo. Hasta en los casos en que se siente al pie colgar algún centímetro por debajo del muñón y desconectado de la pierna, se le experimenta como parte del propio cuerpo, y se mueve en armonía con los demás miembros y con el torso.

No es esencial la amputación para que se dé un miembro fantasma. En algunos accidentes, por ejemplo cuando un motorista sale despedido y se golpea contra el pavimento, el hombro se descoyunta y rompe de tal modo que los nervios del brazo quedan arrancados de su conexión con la espina dorsal, provocando la avulsión del plexo braquial. El fantasma resultante ocupa el puesto del ahora inútil brazo, y lo más general es que esté coordinado con él. Pero, si la víctima mantiene cerrados los ojos, el fantasma suele permanecer en su posición original cuando el brazo auténtico es movido por alguna otra persona. Aunque el brazo de carne y hueso es incapaz de responder a los estímulos, su versión fantasmal es, de ordinario, sumamente dolorosa. Por desgracia, la supresión quirúrgica del brazo real no tiene ningún efecto sobre el brazo fantasma ni sobre el dolor.

Los parapléjicos —personas que han sufrido una rotura completa de la médula espinal y por ello no sienten o no pueden controlar la parte de su cuerpo que queda afectada por la sección— tienen a menudo miembros fantasma, ya como piernas ya



1. EJEMPLOS TIPICOS de miembros fantasma sintetizados en esta figura. Algunas partes del fantasma se sienten con mayor viveza (*zonas más claras de las porciones transparentes de los miembros*). El paciente percibe el miembro fantasma como perfectamente real, lo describe como capaz de estar en distintas posiciones y, a menudo, se queja de sentir dolor en él.



2. TRAYECTORIAS DE LAS SEÑALES, desde el cuerpo hasta el cerebro. Tras la pérdida de un miembro, las células nerviosas de las áreas desnervadas de la espina dorsal y del cerebro se disparan espontáneamente lanzando fuertes descargas.

como otras partes del cuerpo, incluidos los genitales. Inmediatamente después de un accidente, el miembro fantasma puede disociarse del cuerpo auténtico. Por ejemplo, un sujeto puede sentir como si tuviera las piernas por encima del pecho o de la cabeza, aun cuando las esté viendo tendidas sobre el asfalto. Más tarde, sin embargo, los miembros fantasma se mueven en coordinación con el resto del cuerpo, al menos mientras el sujeto mantiene abiertos los ojos. Algunos parapléjicos se quejan de que sus piernas efectúan continuos movimientos giratorios, produciéndoles un penoso cansancio, aunque las piernas auténticas yazgan inmóviles sobre el lecho. Informan también de que sienten miembros fantasma sujetos cuya médula espinal se ha insensibilizado, como en los casos de bloqueo medular que ocurren en ciertos accidentes laborales.

De acuerdo con la explicación tradicional del fenómeno de los miembros fantasma y su dolor, los nervios que han quedado en el muñón, formando al extremo de éste unos nódulos llamados neuromas, seguirían generando impulsos. Estos refluyen a través de la médula espinal y partes del tálamo (una suerte de estación central del cerebro) hasta las áreas somatosensoriales del córtex. En el ámbito de la explicación clásica, esas áreas corticales constituyen los centros de la sensación.

Basándose en un enfoque semejante, los tratamientos del dolor se propusieron cortar la transmisión de los impulsos en todos los niveles del sistema de proyecciones somatosensoriales. Se han seccionado los nervios del muñón, por encima mismo del neuroma o en sus raíces —pequeños haces de fibras que se forman cuando los nervios sensoriales se dividen en ramas menores justo antes de que entren en la médula espinal. Se han cortado también vías del interior de la médula espinal, y se han extirpado áreas del tálamo y del córtex a las que va a parar la información sensorial una vez ha pasado por la región límbica.

Pues bien, aunque con estos procedimientos se ofrece un alivio que dura meses e incluso años, el dolor suele volver. Por otra parte, ninguno de estos procedimientos elimina el miembro fantasma. De lo que se deduce que la actividad del neuroma no puede ser la causa del fenómeno del miembro fantasma, ni del sufrimiento que éste trae consigo.

Otra hipótesis afín traslada de los neuromas a la médula espinal la fuente de los miembros fantasma, sugiriendo que éstos se originan por un exceso de actividad espontánea de las neuronas medulares, que se han quedado sin el caudal normal de información sensorial que recibían del cuerpo. La respuesta de las células, que espontáneamente se disparan, se transmite hasta el córtex, lo mismo que si las neuronas espinales hubieran recibido estimulación externa. Esta hipótesis surgió, en parte, de los resultados de investigaciones realizadas en los años sesenta; se demostró entonces que, tras la sección de los nervios sensoriales, las neuronas de la médula espinal producían espontáneamente un alto nivel de impulsos eléctricos, a menudo de forma anormal y en ráfagas.

Otras observaciones denuncian el carácter insuficiente de esta explicación. Hay parapléjicos que han sufrido un seccionamiento completo de la médula espinal en un punto muy alto de la mitad superior del cuerpo y padecen fuertes dolores en las piernas y la ingle. Pero las neuronas espinales que envían mensajes desde estas zonas al cerebro se originan bastante por debajo del nivel de la lesión, lo que significa que ningún impulso nervioso que provenga de tales neuronas podrá atravesar la brecha del corte.

Alguna investigación reciente ha inducido a proponer que los miembros fantasma tal vez surjan de una porción aún más alta del sistema nervioso central, que se originen en el cerebro mismo. Lo que causaría los fantasmas serían los cambios en el flujo de señales que recorre el circuito somatosensorial del cerebro.

En esa hipótesis se mueve Frederick A. Lenz. Cuando trabajaba en la Universidad de Toronto, observó niveles de actividad anormalmente altos y rebosantes, en ráfaga, en células del tálamo de un paciente parapléjico, que tenía la médula espinal completamente seccionada justo por debajo del cuello y, con todo, sufría dolores en la mitad inferior del cuerpo. Resultó que aquellas células superactivas respondían también a percusiones en cabeza y cuello, aunque las células estaban situadas en la zona del tálamo que normalmente responde sólo a estimulaciones de la parte del cuerpo que se halla por debajo del nivel de la referida lesión medular. Ese caso sugería que la inhibición neural era suprimida por la oleada de señales que iba pasando, a través de sinapsis antes no usadas pero existentes en las neuronas sensoriales, y que se proyectaban así desde la cabeza y el cuello hasta el tálamo.

Cambios de este tipo en el tálamo somatosensorial o en el córtex ayudarían a explicar por qué se producen ciertas sensaciones en miembros que ya no existen o que ya no pueden transmitir señales al cerebro. Sin embargo, las alteraciones en este sistema no pueden por sí mismas justificar los fantasmas y sus dolores. Si esta explicación fuese suficiente, la supresión de las partes afectadas del córtex somatosensorial o del tálamo resolvería ambos problemas.

Está claro que la causa de los miembros fantasma es más compleja de lo que sugieren algunas de estas teorías. Pero no se han propuesto otras hipótesis. En razón de mi interés por los mecanismos del cerebro que originan el dolor, he pensado mucho sobre las causas de los miembros fantasma y de los dolores que comportan y he dedicado largos años al examen de pacientes que los sufrían. Y he llegado a la conclusión de que, en buena parte, los miembros fantasma se originan en el cerebro, como lo sugeriría el trabajo de Lenz. Pero del cerebro entra aquí en juego mucho más que el sistema somatosensorial.

La explicación que se aporte tiene que poder justificar la amplia gama de sensaciones experimentadas, el intenso realismo del fantasma y el convencimiento de que hasta los fantasmas que flotan sueltos le pertenecen al que los está sintiendo. He propuesto un modelo que cumple estos requisitos. Ha sido bien recibido, pero naturalmente se le ha de someter a comprobaciones más completas antes de que su validez pueda darse del todo por segura. Pero hay ya nuevas ideas para abordar la supresión del dolor proveniente de los miembros fantasma.

En esencia, lo que yo postulo es que el cerebro contiene una neuromatriz o retícula de neuronas que, además de responder a la estimulación sensorial, genera de continuo un tipo característico de impulsos que indican que el cuerpo de cada cual es, intacta e inequívocamente, el

Visión y audición fantasmales

Lo mismo que los miembros fantasma, las visiones y las audiciones fantasmales son producidas también por el cerebro en ausencia de estimulación sensorial. Sujetos con la vista impedida por cataratas, o por pérdida de una porción del sistema de procesamiento visual que hay en el cerebro, exponen sus experiencias visivas con finísimo detalle. Este síndrome fue descrito en 1769, en un artículo de Charles Bonnet sobre las notables experiencias visuales de su abuelo Charles Lullin, quien había perdido casi del todo la vista a causa de las cataratas, pero, por lo demás, gozaba de buena salud física y psicológica. Desde entonces, muchas personas mentalmente sanas han informado de experiencias parecidas sobre fantasmas visuales dotados de perfiles y coloridos.

La visión fantasmal coexiste a menudo con un grado limitado de visión normal. La persona que experimenta el fantasma no tiene dificultad en distinguir entre las dos clases de visión. Los episodios de visión fantasmagórica aparecen de pronto, inesperadamente, cuando los ojos están abiertos. Suele atribuírseles realidad, a pesar de la obvia imposibilidad de lo que en ellos se ve. Entre las imágenes fantasmales se incluyen por lo común personas y grandes edificios. Más raramente se ven seres humanos en miniatura y pequeños animales. Las visiones no son meros recuerdos de experiencias pasadas; con frecuencia contienen sucesos, lugares o gentes de los que nunca se había antes sabido.

Las primeras apariciones de imágenes fantasma pueden ser muy sorprendentes. En uno de nuestros estudios, una mujer que había perdido mucha vista por una degeneración de la retina nos dijo que se llevó un susto cuando, al mirar por la ventana, vio un edificio enorme donde a ella le constaba que sólo había un prado con árboles. Aunque cayó en la cuenta de que el tal edificio no era más que una visión fantástica, le parecía tan real que podía calcular sus medidas y describir otros muchos de sus detalles. El edificio desapareció en seguida... sólo para retornar horas después. Esta visión fantasma sigue viniéndole y yéndosele.

La visión fantasmal ocurre las más de las veces en personas de edad, por la presumible razón de que la vista tiende a deteriorarse con los años. Alrededor del 15 por ciento de los sujetos que han perdido del todo o en parte la vista aseguran tener experiencias de visiones fantasma. El porcentaje puede ser aún mayor, porque hay quienes evitan hablar de este fenómeno por miedo a que les tomen por chiflados.

También son muy comunes los sonidos fantasma, aunque poca gente los reconoce como tales. Sujetos que han perdido el oído suelen quejarse de sentir ruidos dentro de la cabeza. Se trata de zumbidos que suenan como silbidos, repiqueteos metálicos, chirridos o el traqueteo de un tren. Pueden ser tan fuertes y desagradables que la víctima necesite ayuda para aguantar la molestia que causan.

Algunos de los que padecen zumbidos dicen oír "sonidos formados": música o voces. Una mujer que había sido música antes de perder el oído asegura que "oye" conciertos de piano, sonatas. La impresión que siente es tan real que en un principio creyó que los sonidos procedían de la radio de un vecino. La mujer dice que le es imposible dejar de oír esa música, que actúa con mayor intensidad por la noche, cuando se propone dormir. Otra mujer, que había perdido gran parte de la vista y del oído, experimentaba visiones y audiciones fantasma. En una ocasión describió con deleite una función de circo que estaba "viendo" y la música que "oía" acompañar las acciones de los figurantes.

Las vistas y los sonidos fantasmales, lo mismo que los miembros fantasma, ocurren cuando el cerebro pierde la información que normalmente le llega de un sistema sensorial. En ausencia de esa información, algunas células del sistema nervioso central se vuelven más activas. Los mecanismos del interior del cerebro transforman esta actividad neuronal en experiencias significativas.

suyo propio. A esto lo llamo neuroconfirmación ["neurosignature"]. Si tal matriz funcionase en ausencia de informaciones sensoriales procedentes de la periferia del cuerpo, produciría la impresión de tener un miembro aun después de su pérdida.

Para producir todas las propiedades con que he caracterizado los miembros fantasma, tal matriz habría de ser muy extensa, abarcando al menos tres de los principales circuitos nerviosos del cerebro. Uno de ellos es la clásica vía sensorial que atraviesa el tálamo y arriba a la corteza somatosensorial.

Un segundo sistema debe de estar constituido por las sendas que, atravesando la formación reticular del tallo cerebral, llevan hasta el sistema límbico, de interés primordial para la vida emotiva y las motivaciones. Este circuito lo incluyo, en parte, porque se ha advertido en parapléjicos con sección de médula espinal en la mitad superior del cuerpo que se sienten poseedores de las funciones de antes y describen las sensaciones que experimentan en las zonas enervadas con los términos con que solían hacerlo antes de la lesión, calificándolas de "dolorosas", "agradables" o "agotadoras".

Un último sistema consta de regiones corticales importantes para el reconocimiento del yo y para la evaluación de las señales sensoriales. Parte principal de este sistema es el lóbulo parietal, que en estudios de pacientes con lesiones cerebrales se ha comprobado que es esencial para el sentido del yo.

De quienes han sufrido una lesión del lóbulo parietal de un hemisferio se cuenta que han querido arrojar una de sus propias piernas fuera de la cama del hospital en que yacían porque estaban plenamente convencidos de que tal pierna pertenecía a un extraño. Semejante conducta prueba que el área dañada imparte normalmente una señal que dice "Este cuerpo es el mío; esto es una parte de mí mismo".

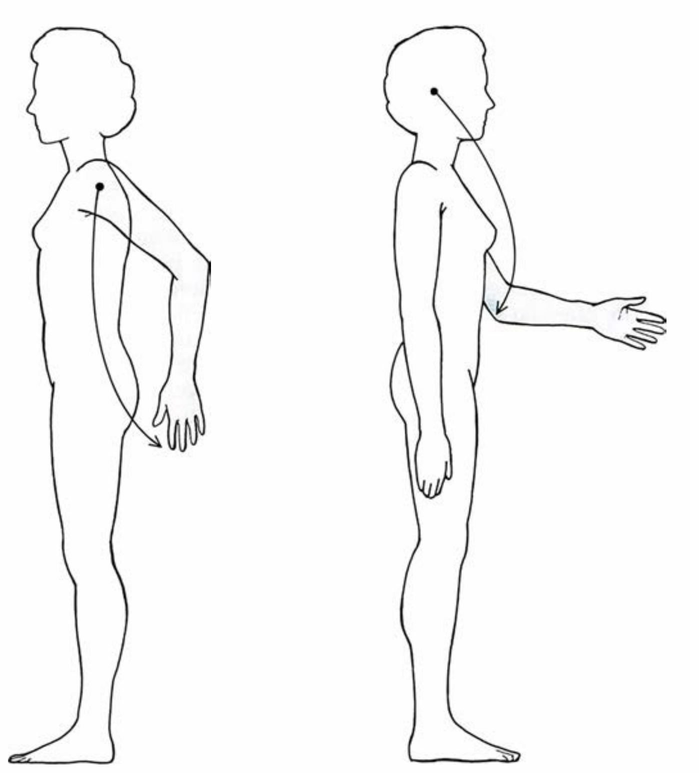
Creo que, cuando las señales sensoriales procedentes de la periferia o de cualquier otro sitio llegan al cerebro, atraviesan, en paralelo, cada uno de estos sistemas. A medida que se van analizando las señales, la información que encierran es compartida por los tres sistemas y convertida en una respuesta integrada que se envía a otras partes del cerebro. En algún lugar de éste, el resultado conjunto se transforma en una percepción consciente, aunque nadie sabe dónde se produce la transformación que lleva hasta la consciencia.

Por dinámica que esta descripción pueda parecer, el proceso que se produce es, probablemente, aún más dinámico. Propongo yo además que, a la vez que la matriz analiza la información sensorial, va imprimiéndole al mensaje emitido su neuroconfirmación característica. El mensaje porta, pues, con la información sobre los datos de los sentidos, la seguridad de que la sensación se está produciendo dentro del propio cuerpo del sujeto. La neuroconfirmación es comparable al tema de una pieza orquestal. El sonido colectivo cambia cuando sus partes tocan diferentes instrumentos (la información recibida), pero el producto es configurado continuamente por el tema subyacente (la "neuroconfirmación"), que da continuidad a la obra aun cuando cambien los detalles de su ejecución.

La neuroconfirmación específica de un individuo vendría determinada por el patrón de conexiones entre las neuronas de la matriz —neuronas relacionadas con otras y número, tipos e intensidad de las sinapsis. Los lectores familiarizados con la neurología advertirán que mi concepción de la neuromatriz tiene similaridades con la noción de asamblea de células propuesta hace ya mucho por Donald O. Hebb, de la Universidad McGill. Defendía Hebb que, cuando la información sensorial activa simultáneamente dos células cerebrales, las sinapsis intercelulares forman conexiones más fuertes. En algunos casos, el proceso origina grandes reuniones de células interconectadas, de suerte que una señal que le llega a una parte de la asamblea se difunde por todo el resto, aunque la asamblea o reunión se extienda por amplias zonas del cerebro.

Me aparto, empero, de Hebb, en cuanto que yo me imagino la neuromatriz como una asamblea cuyas conexiones están determinadas ante todo por los genes, no por la experiencia. Cierto que la matriz podría ser después modificada por la experiencia, que añadiría o quitaría, reforzaría o debilitaría las sinapsis existentes. A modo de ejemplo: la experiencia capacitaría a la matriz para almacenar los recuerdos del dolor producido por una úlcera gangrenosa y podría explicar así la frecuente reaparición del mismo dolor en miembros fantasma.

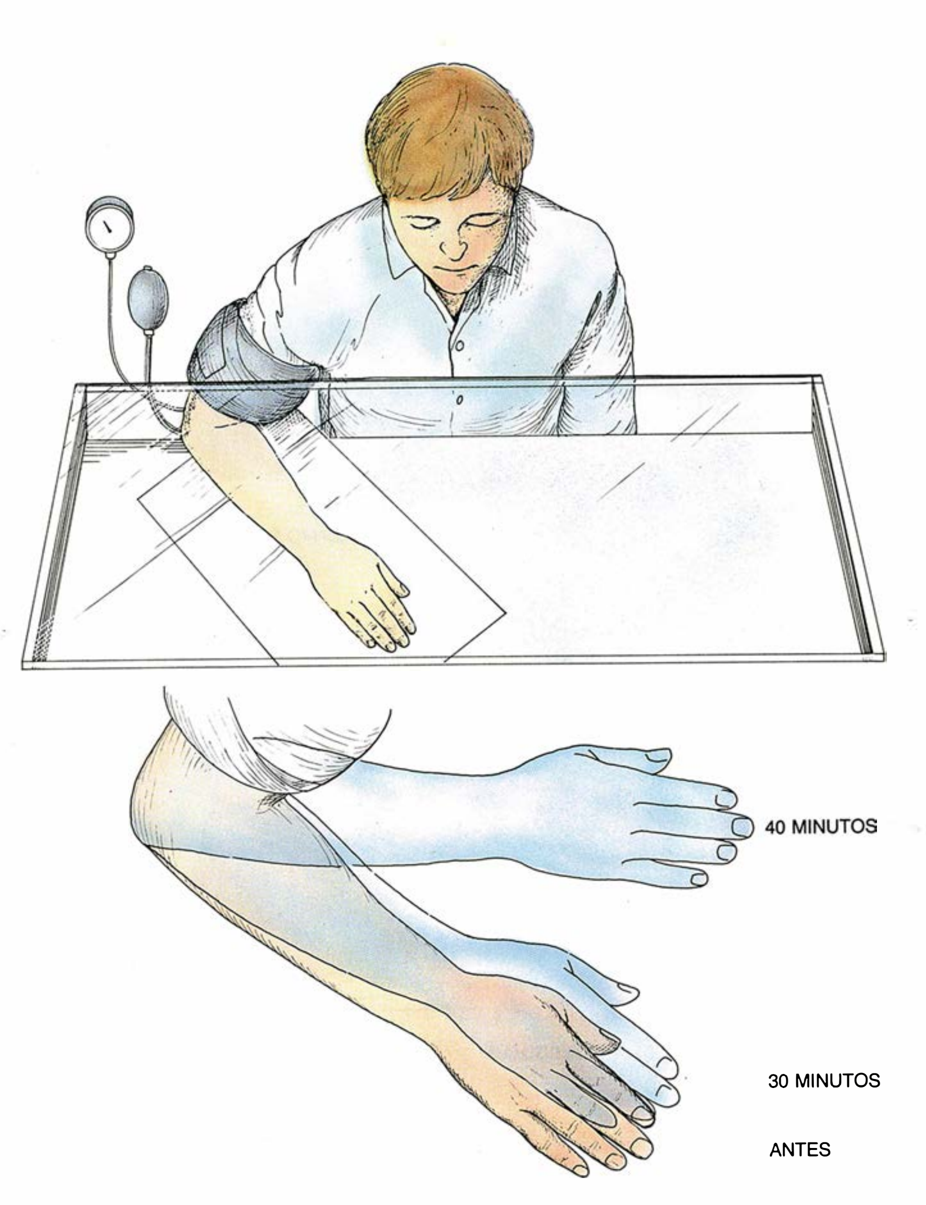
Pienso que la matriz está ya en gran parte preinstalada. Me avala un dato contundente: se conocen muchos casos de personas que, habiendo nacido sin un brazo o sin una



3. PRESUNTAS SENSACIONES de dolor en un brazo fantasma aseguró tenerlas una mujer al recibir estímulos eléctricos en dos sitios diferentes (*puntos*). La estimulación en el muñón produjo la sensación de calambres eléctricos que saltaban de un dedo a otro. La estimulación de la oreja derecha hizo que el codo fantasma sintiese calor y produjo una sensación de pulsaciones que bajaban hasta la muñeca y el dedo pulgar del miembro fantasma. Estas observaciones las realizaron Joel Katz, actualmente en la Universidad de Toronto, y el autor.

pierna, experimentan con mucha viveza el correspondiente miembro fantasma. Así, un inteligente y serio muchachito de ocho años, que nació con las piernas paralizadas y con un brazo derecho que termina en el codo, nos asegura que, cuando aprieta este codo contra un resorte para poner en movimiento su silla de ruedas, emergen de su codo y agarran los bordes del resorte unos dedos miembro "como los dedos de cualquier otra persona". Fantasmas como éste pueden persistir en la edad adulta: un ingeniero de 32 años, que nació con una de las piernas acabada en la rodilla, dice que el resto de su pierna y su pie fantasmas los siente vivos, aunque se esfuman durante varias horas una o dos veces por semana. Cuando vuelven, siempre le asombra y le agrada.

Nótese, entre paréntesis, que no es verdad lo que tanto tiempo se ha creído de que los miembros fantasma sólo se experimentan cuando hubo una amputación pasados los seis o los siete años de edad. Mi alumna posdoctoral Renée Lacroix y yo hemos confirmado anteriores informes sobre niños que perdieron un miembro cuando tenían sólo uno o dos años y sentían la presencia de miembros fantasma. También hemos tratado a niños que padecen dolorosos fantasmas de piernas que perdieron antes de los dos años de edad.



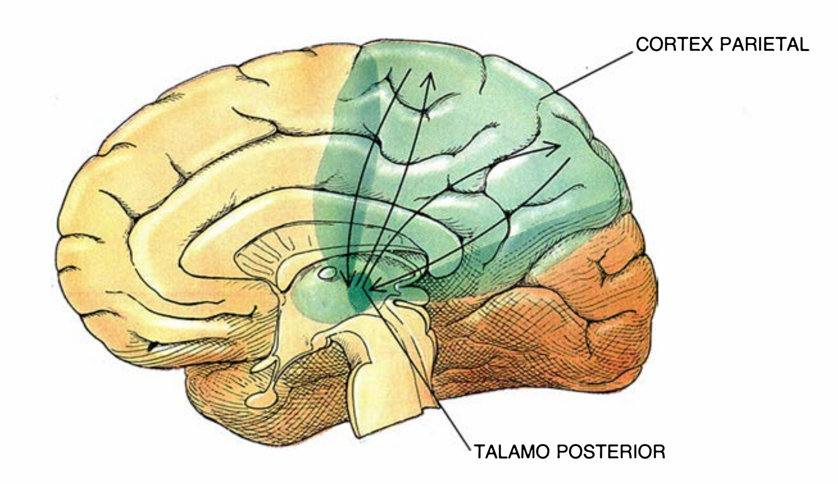
4. UN BRAZO REAL insensibilizado mediante una faja de presión hinchada parece un brazo fantasma. El sujeto no podía ver su brazo, porque la superficie de la mesa estaba cubierta con un paño negro. Muéstranse las distintas posiciones de la mano: sentida antes de hincharse la faja, y después de los intervalos en que parecía irse acercando al cuerpo. Este estudio fue realizado en colaboración con Yigal Gross, actualmente en la Universidad de Bar-Ilan, de Israel.

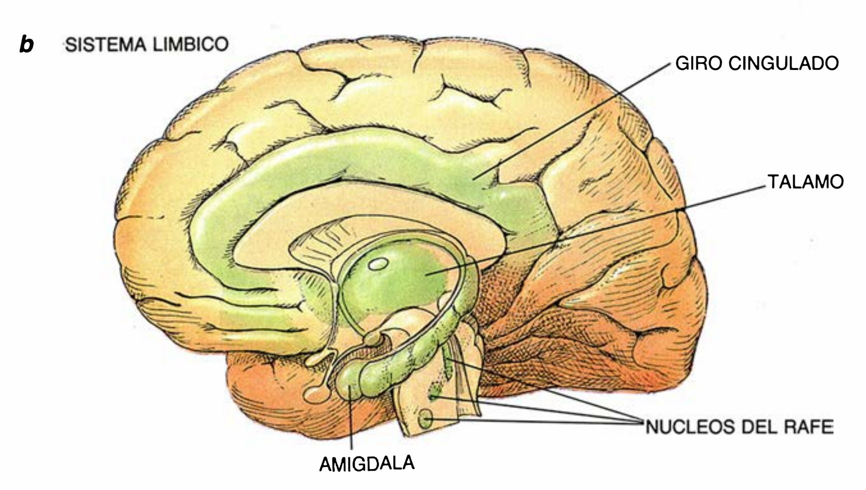
En circunstancias normales, pues, los mil y un matices de las sensaciones que la gente experimenta son atribuibles a las variaciones de la información recibida por los sentidos ("input sensorial"). Estos estímulos son analizados y convertidos en complejas experiencias de sensación y de consciencia del yo por una matriz que en gran parte está previamente configurada. Con todo, aun en ausencia de estímulos externos, muchas de esa misma gama de experiencias pueden ser generadas por otras señales que pasan por la neuromatriz... tales como las producidas por la activación espontánea de neuronas en la matriz misma o en la médula espinal o las producidas por los neuromas. Indiferentemente de cuál sea el origen de la información que llega a la matriz, se daría igual resultado: rápida difusión de las señales por toda la matriz y percepción de un miembro dentro de un yo unitario, aun cuando falte el miembro auténtico.

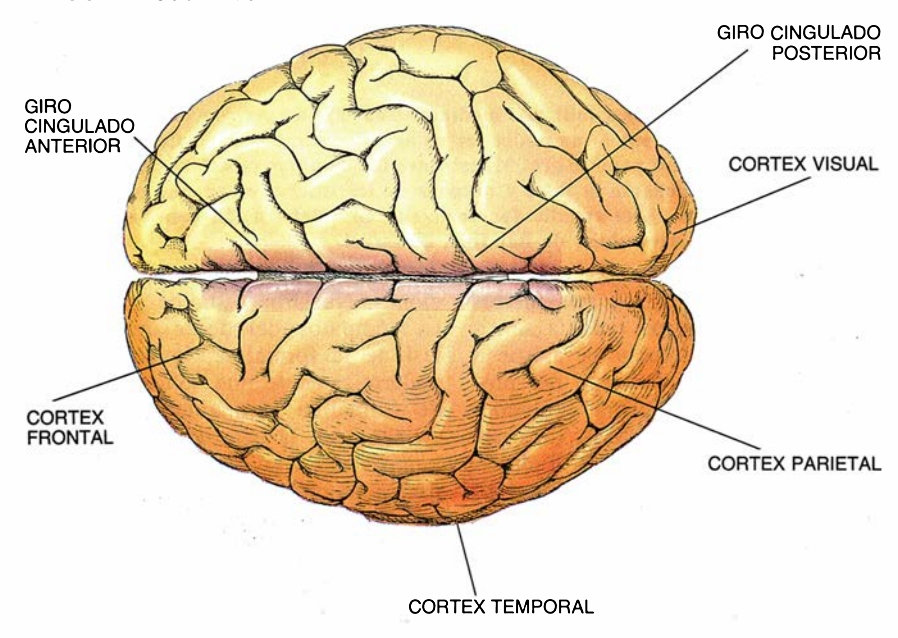
El que a veces se esfumen durante algún tiempo los miembros fantasma y el dolor que conllevan se explicaría si las neuronas cerebrales que una vez respondieron a miembros luego perdidos o paralizados formaran conexiones cada vez más fuertes con partes del cuerpo todavía sensibles y empezaran luego a asistir a dichas regiones. A lo largo del proceso mudaría el esquema neuroconfirmatorio, con el resultado de cambios en el fantasma y en el dolor. Pero los miembros fantasma no suelen desaparecer para siempre. De hecho, pueden retornar decenios después de que parezcan haberse ido, señal de que la neuromatriz, aunque modificada, conserva permanentemente muchos de sus rasgos.

Con mis discípulos Anthony L. Vaccarino, John E. McKenna y Terence J. Coderre, hemos reunido pruebas directas y evidentes que corroboran mi tesis de que el cerebro —y por supuesto la neuromatriz— pueden generar por su cuenta sensaciones. Nuestros estudios se basaron en cómputos del dolor mediante el test de la formalina. Inyectamos hipodérmicamente una solución diluida de formalina (formaldehído disuelto en agua) en la pata de una rata, que le provocaba un dolor cuya intensidad aumentaba y disminuía rápidamente durante los primeros cinco minutos después de la inyección. (Del grado y duración de la molestia nos da cuenta la reacción del animal, que se lame la zona afectada.) A esta "pronta" respuesta le sigue un dolor "más tardío", que comienza alrededor de 15 minutos después de la inyección y persiste aproximadamente durante una hora.

Por medio de este test averiguamos que el bloqueo anestésico de la pata oblitera por completo el dolor







5. LA FUENTE DE LOS MIEMBROS FANTASMA piensa el autor que implica la actividad de tres de los circuitos neurales del cerebro. Uno de ellos (*a*) lo constituyen las áreas receptoras somatosensoriales y el córtex parietal adyacente, que procesan la información relativa al cuerpo. La segunda área (*b*) es el sistema límbico, que está relacionado con la emoción y con la motivación. La tercera (*c*) abarca las amplias redes corticales implicadas en las actividades cognitivas, entre ellas en la memoria de la experiencia pasada y en la evaluación de los informes sensoriales concernientes a la consciencia del propio yo.

tardío, pero sólo si la anestesia se aplica a tiempo de impedir la respuesta precoz. Una vez que ha ocurrido ésta, la droga sólo amortigua parcialmente la respuesta más tardía. Esta observación de que el dolor continúa aun después de ser bloqueados los nervios que transmiten las señales dolorosas nos da a entender que el dolor de larga duración (el que ocurre en los miembros fantasma) es determinado no sólo por la estimulación sensorial durante la molestia, sino también por procesos cerebrales que persisten sin que haya continuidad en la información.

Pero, ¿qué es exactamente lo que hace que duelan los miembros fantasma? La queja más común es la de sentir quemazón. Esta sensación podría derivarse de la falta de señalización sensorial del miembro a la matriz nerviosa. Sin su acostumbrada estimulación sensorial, la neuromatriz producirá probablemente altos niveles de actividad de un modo brusco, en ráfagas, tal como lo observó Lenz en el tálamo. Este tipo de señal puede muy bien transformarse en una sensación de abrasamiento.

Otro dolor quizá resulte del esfuerzo de la neuromatriz por hacer que los miembros se muevan según lo acostumbrado. Cuando los miembros no responden, como sucede con los parapléjicos y en los amputados, la neuromatriz (que estaría preconfigurada para "suponer" que los miembros pueden en realidad moverse) tal vez despache más frecuentes y más enérgicos mensajes, urgiéndoles a los músculos a mover el miembro en cuestión. Estos mensajes quizá se perciban como contracciones y calambres. O puede que se los sienta como lancinante dolor.

La investigación para someter a prueba algunas de estas ideas y hallar nuevas maneras de eliminar el dolor está todavía en mantillas, pero empiezan a conseguirse curiosos resultados. La necesidad de tales tratamientos es urgente, tanto porque los sufrimientos pueden ser terribles y pertinaces como porque son pocos los métodos disponibles que resulten a la larga eficientes.

Por el momento, se están empleando varias terapias. La estimulación del muñón con corrientes eléctricas, con un vibrador o por medio de acupuntura alivia a algunos amputados. A otros les ayudan el relajamiento y la hipnosis. Hay sujetos que descansan con drogas que suelen prescribirse para combatir la epilepsia o la depresión, y otros pacientes alivian sus dolores con una combinación de depresivo y narcótico (metadona). Pero aproximadamente

la mitad de quienes padecen, persistentemente o a largo plazo, un miembro fantasma doloroso no responden a ningún tratamiento curativo.

Sobre una base más prometedora se asienta el DREZ ("dorsal root entry zone"), tratamiento en el que se procede a abolir selectivamente el dolor del miembro fantasma, aunque no los miembros fantasma mismos; su éxito alcanza al 60 por ciento de los pacientes tratados. Consiste este procedimiento, desarrollado por Blaine S. Nashold, de la Universidad de Duke, en la destrucción neuroquirúrgica de las células de la médula espinal que reciben información directa de los nervios sensoriales del muñón, eliminando específicamente las células allí donde las raíces sensoriales entran al cordón medular. (En los intentos anteriores por amortiguar el sistema de proyección somatosensorial solían cortarse las raíces sensoriales o las vías de transmisión en la médula espinal.) El procedimiento DREZ es tan nuevo que nadie sabe todavía cuánto persiste el alivio.

Mi modelo de funcionamiento del cerebro supone que la neuromatriz en cuanto tal contribuye al dolor; por ello sugiere que el alterar la actividad de las vías no pertenecientes al sistema somatosensorial podría ser importante, ya por sí solo ya en combinación con otros tratamientos. Un lugar para empezar a hacerlo es el sistema límbico. Hasta ahora, en los esfuerzos por aliviar el dolor se ha relegado a un papel secundario a las estructuras límbicas, porque los estímulos dañinos no las activan directamente. Sin embargo, si el sistema límbico contribuye a que la neuromatriz emita su mensaje, como yo lo he propuesto, bien puede ser que contribuya a que se sienta dolor en los miembros fantasma.

Vaccarino, McKenna, Coderre y yo hemos empezado a someter a prueba la influencia de la manipulación del sistema límbico en el amortiguamiento del dolor. Hemos demostrado que la inyección localizada de lidocaína en diversas áreas del sistema límbico produce sorprendentes disminuciones del dolor provocado experimentalmente en ratas, incluso de un tipo de dolor de miembro fantasma. (La lidocaína pertenece a la familia de la cocaína e impide a las neuronas transmitir señales.) Un enfoque similar sería viable en los humanos, pero requiere más estudio.

El fenómeno de los miembros fantasma es algo más que un reto a la práctica médica. Pone en aprieto a supuestos básicos de la psicología; por ejemplo, la idea de que las sensaciones sólo se producen por estímulos, con la hipótesis colateral de que la percepción sin estímulos constituiría una anomalía psicológica. Pero resulta que los miembros fantasma, así como el ver y el oír fantasmas, indican que esa noción es errónea. El cerebro no se limita a detectar y analizar la información recibida de los sentidos: genera experiencia perceptual aun cuando no haya información externa. Es indiscutible que para sentir un cuerpo no necesitamos tenerlo.

Otro supuesto que se considera firmísimo es el de que la percepción del propio cuerpo resulta de datos sensibles que dejan un recuerdo en el cerebro; el total de esas señales llega a ser la imagen del cuerpo. Pero la existencia de miembros fantasma en personas nacidas sin algún miembro o que lo perdieron en temprana edad sugiere que las redes neurales necesarias para la percepción del cuerpo y de las partes de éste se hallan instaladas en el interior del cerebro. La falta de información sensorial no impide que esas redes emitan mensajes sobre partes del cuerpo que en realidad no existen; y tales mensajes continúan emitiéndolos durante toda la vida del sujeto.

En resumen, los miembros fantasma sólo son un misterio si se supone que el cuerpo envía mensajes sensoriales a un cerebro que los recibe pasivamente; son, en cambio, comprensibles si se reconoce que el cerebro genera la experiencia del cuerpo. La información sensorial modula meramente esta experiencia, pero no es la causa directa de ella.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

BODY IMAGE: DISSOCIATION OF REAL AND PERCEIVED LIMBS BY PRESSURE-CUFF ISCHEMIA. Y. Gross y R. Melzack en *Experimental Neurology*, vol. 61, n.º 3, págs. 680-688; 15 de septiembre de 1978.

PHANTOM LIMBS, THE SELF AND THE BRAIN: THE D. O. HEBB MEMORIAL LECTURE. R. Melzack en *Canadian Psychology*, vol. 30, n.º 1, págs. 1-16; enero de 1989.

CENTRAL NERVOUS SYSTEM PLASTICITY IN THE TONIC PAIN RESPONSE TO SUBCUTANEOUS FORMALIN INJECTION. T. J. Coderre, A. L. Vaccarino y R. Melzeck en *Brain Research*, vol. 535, n.º 1, págs. 155-158; 3 de diciembre de 1990.

PAIN "MEMORIES" IN PHANTOM LIMBS: REVIEW AND CLINICAL OBSERVATIONS. J. Katz y R. Melzack en *Pain*, vol. 43, n.º 3, págs. 319-336; diciembre de 1990.

THE ROLE OF THE CINGULUM BUNDLE IN SELF-MUTILATION FOLLOWING PERIPHERAL NEURECTOMY IN THE RAT. A. L. Vaccarino y R. Melzack en *Experimental Neurology*, vol. 111, n.º 1, págs. 131-134; enero de 1991.

Estructuras superespirales

El número de frecuencias que aparecen en un sistema dependiente del espacio y el tiempo permite analizar las superestructuras espirales que se forman y en virtud de las cuales se produce una transición del sistema al caos

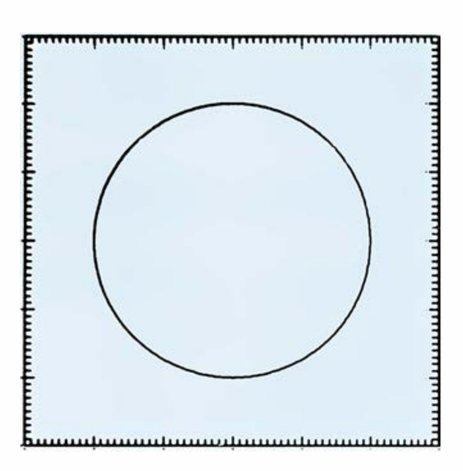
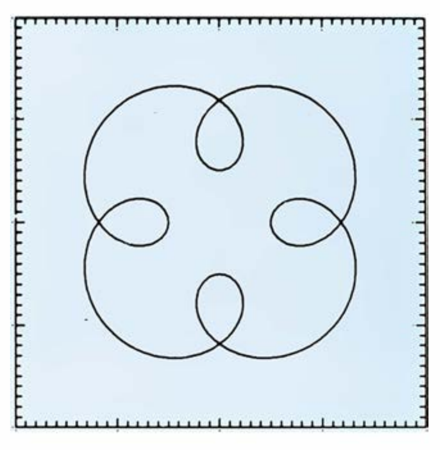
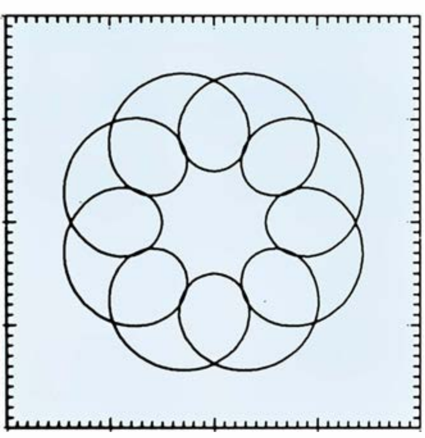
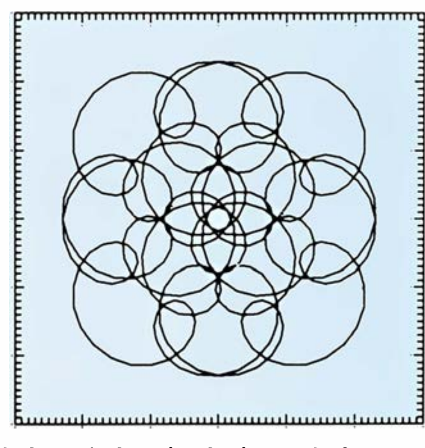
Vicente Pérez Muñuzuri

El microscopio nos posibilitó descubrir las células, los microorganismos y los virus, y ha sido la herramienta decisiva para el progreso de la biología y la medicina. El telescopio, por su lado, nos adentró en las inmensidades del espacio. Pero la ciencia reservaba para nuestros días la creación de un poderosísimo instrumento para dilatar nuestro campo de estudio: la dinámica no lineal, gracias a la cual abordamos y ponemos en relación métodos y técnicas de disciplinas muy dispares, desde la biología y la medicina hasta la física y la matemática, pasando por la química, la historia o la economía.

Hasta hace relativamente poco, confiábase en la aparente sencillez de la naturaleza y en su posible simulación con modelos lineales o cuasilineales. Llámanse modelos lineales o cuasilineales aquellos que pueden describirse por una o varias ecuaciones diferenciales, resolubles analíticamente en términos de funciones matemáticas elementales. Los sistemas no lineales presentan problemas de resolución de índole distinta. Sabemos muy poco que sea de naturaleza general sobre las ecuaciones no lineales.

Sin embargo, la potencia creciente de los ordenadores y su incorporación cada vez más eficaz en la investigación científica han promovido la utilización de modelos no lineales y como inmediata consecuencia el desarrollo de una serie de técnicas numéricas capaces de tratarlos. A diferencia de las técnicas físicas propiamente dichas (experimentales, observacionales, etcétera), estas técnicas numéricas se basan en el conocimiento previo de las trayectorias que siguen dichas variables en torno a las soluciones aproximadas de esos modelos (puntos críticos del sistema de ecuaciones diferenciales). Con este conocimiento, es posible predecir el tipo de comportamiento que va a seguir nuestro sistema, que luego habrá de confirmarse con el ordenador.

Además, la percepción progresiva de que muchos fenómenos de la naturaleza admiten una modelización similar, aun siendo completamente ajenos los unos a los otros, ha promovido la utilización de modelos

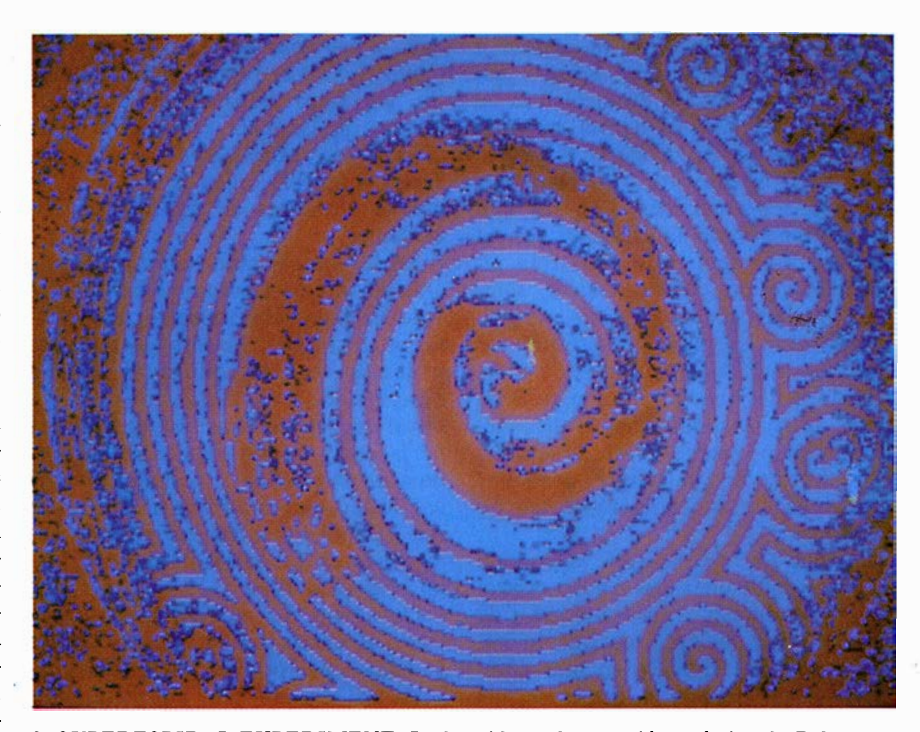
1. RECORRIDOS POSIBLES de la punta de la espiral según el número de frecuencias que aparecen sobre el sistema. Este movimiento puede considerarse suma de varios movimientos armónicos. La figura superior izquierda corresponde al caso en el que sólo hay una frecuencia sobre el sistema. A continuación con dos frecuencias distintas, en las que el número de pétalos cambia. Una posibilidad de incluir tres frecuencias sobre el sistema, introduciendo a la vez un efecto de renormalización (hallar repetida la misma figura dentro del original), se esboza abajo, a la derecha.

VICENTE PEREZ MUÑUZURI se formó en la Universidad de Santiago de Compostela. Ha trabajado durante dos años en el centro Paul Pascal del CNRS en Burdeos y ha sido investigador invitado de la Academia de Ciencias Rusa de Pushchino. Sus temas de interés se centran en el estudio de estructuras espacio-temporales y en el análisis de su dinámica.

no lineales. Citemos, a modo de ejemplo, la reorganización espacial de las amebas sociales *Dyctiostelium discoideum* en forma de ondas espirales, las relaciones comerciales de un país con su entorno, los dibujos de las conchas de ciertos moluscos, las formas rayadas de la piel de algunos mamíferos (tigres, cebras o jirafas), la disposición de las ramas de un árbol, la predicción del tiempo meteorológico y el desenvolvimiento epigenético de los organismos.

Todos los ejemplos mencionados tienen en común el tratarse de un diseño regular que se va configurando en el espacio y en el tiempo; se trata, pues, de estructuras temporales. Este tipo de configuraciones pueden modelizarse por un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales acopladas, cuyo mecanismo de resolución no es obligado entender para captar intuitivamente el desarrollo físico subyacente. Resolución que, además, necesita del auxilio del ordenador para operar los cálculos requeridos.

Bajo ciertas condiciones puede ocurrir que estas estructuras espacio-temporales se reorganicen jerárquicamente para dar lugar a una superestructura. Este fenómeno se ha observado en diferentes campos; por ejemplo, en la formación de superagregados de complejos metálicos (agregados de agregados) en física del estado sólido, la estructura a gran escala del universo (macroestructuras) o la estructura interna de los cromosomas. En este último caso, la doble cadena de ADN con las proteínas histonas de los nucleosomas crea la estructura terciaria (cromatina), que se superespiraliza y condensa durante la mitosis celular para originar el cromosoma enrollado en hélice, o estructura cuaternaria, con zonas de mayor empaquetamiento llamadas cromómeros.



2. SUPERESPIRAL EXPERIMENTAL obtenida en la reacción química de Belousov-Zhabotinsky. Esta superestructura resulta del acercamiento mutuo entre frentes de onda de la espiral de base al recorrer su extremo una trayectoria determinada por dos frecuencias. La imagen obtenida responde a la diferencia entre dos imágenes consecutivas en un intervalo de dos minutos. Se trata de una imagen digital y en falso color. La longitud de onda de la superespiral sextuplica la espiral de base. La longitud de onda define la distancia entre los frentes de onda de la estructura. Lejos del centro del vórtice desaparece ese efecto.

Un tipo de estructura espacio-temporal que ha atraído la atención de los investigadores y ha sido objeto de intenso estudio es el de las ondas espirales, que aparecen espontáneamente en múltiples contextos biológicos, fisiológicos y químicos. Probablemente uno de los más investigados haya sido el relativo a las ondas que ocurren en la reacción química de Belousov-Zhabotinsky (conocida también por reacción de Belousov, Zhabotinsky y Zaikin en honor de tres químicos rusos: B. P. Belousov, A. M. Zhabotinsky y A. N. Zaikin). Se trata de un sistema bastante más sencillo que los que se dan en fisiología.

En esta reacción, debido a fluctuaciones en el medio o inhomogeneidades físicas dentro del mismo, aparecen espontáneamente ondas que se propagan con una velocidad fijada por los componentes químicos de la reacción. La forma de los frentes de onda viene determinada por el gradiente de concentraciones de los componentes químicos de la reacción. Uno de los componentes es un catalizador (indicador): ferroína, cerio, rutenio u otros; gracias al cual podemos percibir fácilmente dichos frentes en el cambio de color que se produce entre la fase excitada y la estable (azul y rojo, amarillo e incolora, etcétera). Las ondas espirales en este medio reactivo rotan con un período y velocidad que son característicos de las concentraciones de los componentes de la reacción.

Las ondas espirales exhiben una amplia variedad de comportamientos dinámicos, más o menos complejos, que dan lugar a formas simétricas o asimétricas de los frentes de onda. Así, por ejemplo, el tejido cerebral desarrolla ondas electroquímicas que se propagan por la corteza. Denuncian la despolarización de la membrana neuronal y una caída de la actividad nerviosa. M. Shibata y J. Bures, este último electrofisiólogo de la Universidad de Praga, estudiaron experimentalmente entre 1972 y 1974 el fenómeno y demostraron la existencia de ondas que rotan alrededor de una lesión en el tejido cerebral de la corteza de rata.

Se ha observado también la formación de esas ondas espirales en la desorganización de las contracciones coordinadas de las fibras musculares del corazón por culpa de la fibrilación muscular. En un corazón aquejado de la misma se observa la vibración independiente de pequeñas regiones del tejido. V. I. Krinsky, A. T. Winfree y M. A. Allesie, de las universidades de Moscú y Arizona, estudiaron las aplicaciones de este enfoque al conocimiento del paro cardíaco. En su opinión, a la fibrilación muscular cardíaca precede la aparición de espirales generadas por impulsos eléctricos. Cuando aquéllas ocurren en el músculo cardíaco, suprimen las oscilaciones normales del corazón, y éste late con la frecuencia de los vórtices, frecuencia más alta que la normal del corazón; el fenómeno se conoce en medicina por taquicardia o arritmia.

Llegados a este punto, conviene introducir algunos elementos clave que nos definan las propiedades características de las ondas espirales o

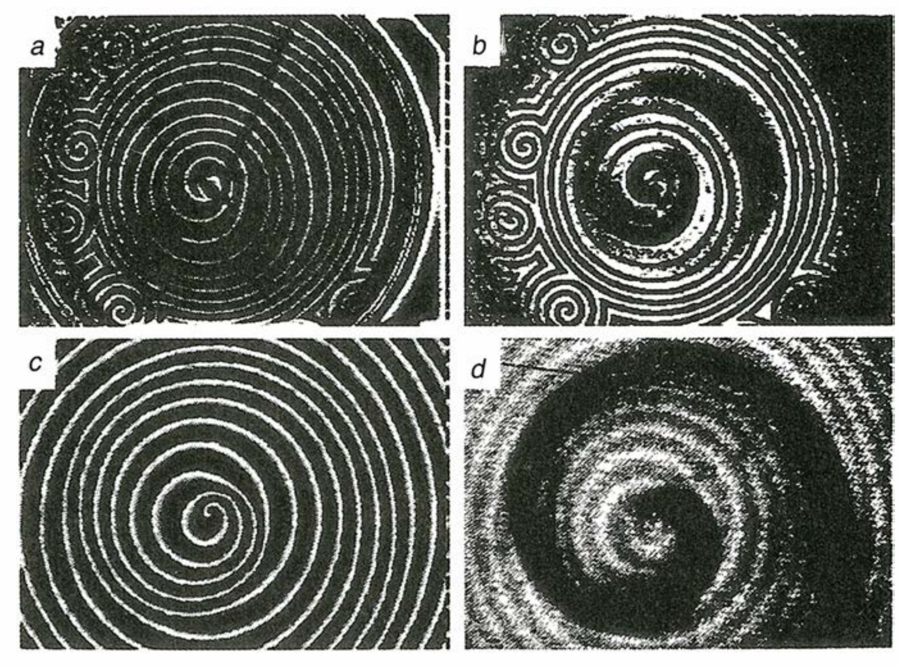
vórtices, que habremos de utilizar a lo largo del artículo. Las espirales admiten una descripción geométrica en su forma más simple: la espiral arquimediana. Es decir, en los ejes x e y viene descrita respectivamente como una función seno y coseno, en las que la amplitud varía linealmente con el ángulo. Este tipo de espiral rota alrededor de un centro circular, también llamado núcleo, con un período temporal y espacial (longitud de onda) determinados por las características del medio. La longitud de onda de una espiral de tipo arquimediano es proporcional a la amplitud del núcleo a cuyo alrededor gira y es constante en todas las direcciones.

Por otra parte, se sabe que, bajo ciertas condiciones, las ondas espirales no se limitan a girar alrededor de un centro o núcleo, sino que lo hacen sobre una figura algo más complicada, que semeja la corola de una flor, e incluye la participación de una segunda frecuencia sobre el sistema. Arthur T. Winfree, de la Universidad de Arizona, empleó el adjetivo envolvente ("meander") para calificar el movimiento seguido por el extremo libre de estas ondas: vendría a ser como un movimiento circular compuesto de la punta. Desde una óptica descriptiva, el camino seguido por este extremo de la espiral se parece a un epicicloide, es decir, parece girar alrededor de un punto que, a su vez, se mueve sobre un punto fijo en el centro de las órbitas. En un símil imaginario, el movimiento de la punta sería el de rotación de la Luna alrededor de una Tierra invisible que, a su vez, se mueve alrededor de un Sol fijo en el centro.

En la comparación anterior, de exclusivo interés figurativo, hemos dejado de lado, por supuesto, los efectos gravitatorios, las órbitas elípticas y demás nociones obligadas en una descripción real. Siguiendo con la metáfora, el movimiento envolvente de la punta podría explicarse en función de los radios y períodos orbitales de la Luna alrededor de la Tierra, que también tendría sus propias características orbitales al girar en torno a un Sol fijo.

Otro tipo de movimiento equivalente, al menos por el número de frecuencias que ocurren en el sistema, sería el seguido por un punto que recorriera una flor polipétala. Este punto recorre, uno a uno, los diferentes pétalos y a la vez se mueve alrededor del centro de la corola. En nuestra descripción no haremos distinción entre ambos tipos de movimiento y hablaremos de trayectorias petaliformes para el caso en el que aparezcan dos frecuencias en el recorrido seguido por la punta de la espiral.

En un sistema espacio-temporal como el ligado a la dinámica de espirales acontece que, al acercarse más allá de cierta longitud de onda (menor que el tamaño del frente), los frentes que configuran la espiral pueden romperse y disgregarse en múltiples espirales pequeñas que se propagan por el medio. Esta transición de un tipo de dinámica a otro se denomina bifurcación hacia el caos espacio-temporal. Hoy por hoy, sin embargo, apenas se conoce la naturaleza de esa transición, así como los parámetros externos que modifican este comportamiento.



3. ESPIRAL Y SUPERESPIRAL, experimental y obtenida con un modelo de reacción-difusión capaz de desacoplar numéricamente las escalas espacial y temporal. A la izquierda, (*a*) y (*c*), se encuentran las espirales de base; a la derecha, (*b*) y (*d*), las correspondientes imágenes tratadas para observar con mayor claridad la superespiral. En *a* se distingue la sombra del electrodo utilizado para incrementar el efecto envolvente necesario para obtener las superespirales al aplicarse un campo.

Recientes experimentos, numéricos y de laboratorio, realizados por el autor en el grupo de física no lineal de la Universidad de Santiago de Compostela que dirige V. Pérez Villar, en el centro Paul Pascal del C.N.R.S. en Burdeos con P. Hanuse y en el Instituto de Biofísica Teórico y Experimental de la Academia de Ciencias Rusa de Pushchino con Valentin I. Krinsky, han demostrado que las espirales pueden reorganizarse para formar una superestructura que llamamos superespiral.

Para poder percibir las superespirales deben satisfacerse dos requisitos: la presencia de muchas vueltas de la espiral de base y un elevado cociente entre las frecuencias ocurrentes en el movimiento seguido por la punta. Cuando la punta de la espiral sigue una trayectoria petaliforme en la que aparecen dos frecuencias, los frentes de onda del vórtice se separan o se juntan en algunas direcciones. La espiral tiene entonces una forma asimétrica, en la que la longitud de onda no es constante en todas las direcciones y se distinguen con nitidez dos zonas: donde se concentran los frentes y donde quedan separados. La superespiral se nos manifiesta entonces como el conjunto de las zonas del espacio en las que los frentes se han acercado entre sí.

La superestructura en cuestión parece desarrollarse por encima de la espiral original, por lo que hablaremos de superespiral y de espiral de base u original, para poder distinguir dos fenómenos que son distintos, aunque están asociados, ya que sin la presencia de la primera no es posible la segunda. Esta superestructura dibuja, asimismo, una espiral y se comporta como la original: gira alrededor de un núcleo, si bien su longitud de onda y período superan varias veces los de su antecesora.

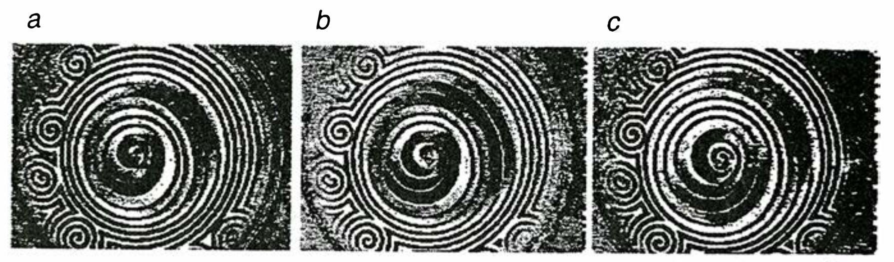
Por vía experimental se ha provocado la formación de tales estructuras en medios excitables, en particular las reacciones químicas de Belousov-Zhabotinsky; la ferroína empleada de indicador se inmovilizа-

ba en un gel de sílice y se cubría con una capa líquida delgada con los demás componentes de la reacción: bromato sódico, ácido malónico y ácido sulfúrico, en las cantidades apropiadas.

Con la aplicación de un campo eléctrico radial alterno de baja frecuencia, la punta de la espiral iniciaba un movimiento envolvente, con un alto cociente entre las dos frecuencias. El campo eléctrico aumentaba el tamaño del núcleo de la espiral de base al atraer, hacia el electrodo positivo (situado sobre la punta), los iones negativos de bromuro, Br^-: el tamaño del núcleo crece gracias al efecto de apantallamiento eléctrico que ocurre sobre el electrodo, sumado al efecto inhibidor de los iones. Con el incremento de su núcleo, cambia su longitud de onda y el período temporal. Conseguimos el segundo requisito necesario para la aparición de superespirales, muchas vueltas de la espiral original o de base, a través del incremento paulatino de la concentración de ácido sulfúrico en la reacción química. De ese modo construimos una espiral de 14 vueltas, que poseía un período T_s, en torno a unos 94 segundos y una longitud de onda (λ_s) de unos 0,34 centímetros.

Trabajábamos con un campo eléctrico de 1,5 volts y unos cinco miliampères. Alternando períodos de encendido, de cuatro minutos de duración, con períodos de apagado, de siete minutos, de dicho campo, el núcleo crecía y menguaba alternativamente; inducíase en la reacción un efecto envolvente que conducía a la aparición de la superespiral. El período de esta superestructura, T_{ss}, era de unos 540 segundos, y poseía una longitud de onda, λ_{ss}, de un par de centímetros; sextuplicaba, pues, a los valores correspondientes de la espiral de base. En cambio, la velocidad lineal de los frentes de onda era aproximadamente la misma. La superespiral no desaparecía con el tiempo, sino que giraba al compás de la espiral de base; los extremos de ambas espirales siempre coincidían. Pero sí desaparecía el efecto de superestructura lejos del centro de la espiral.

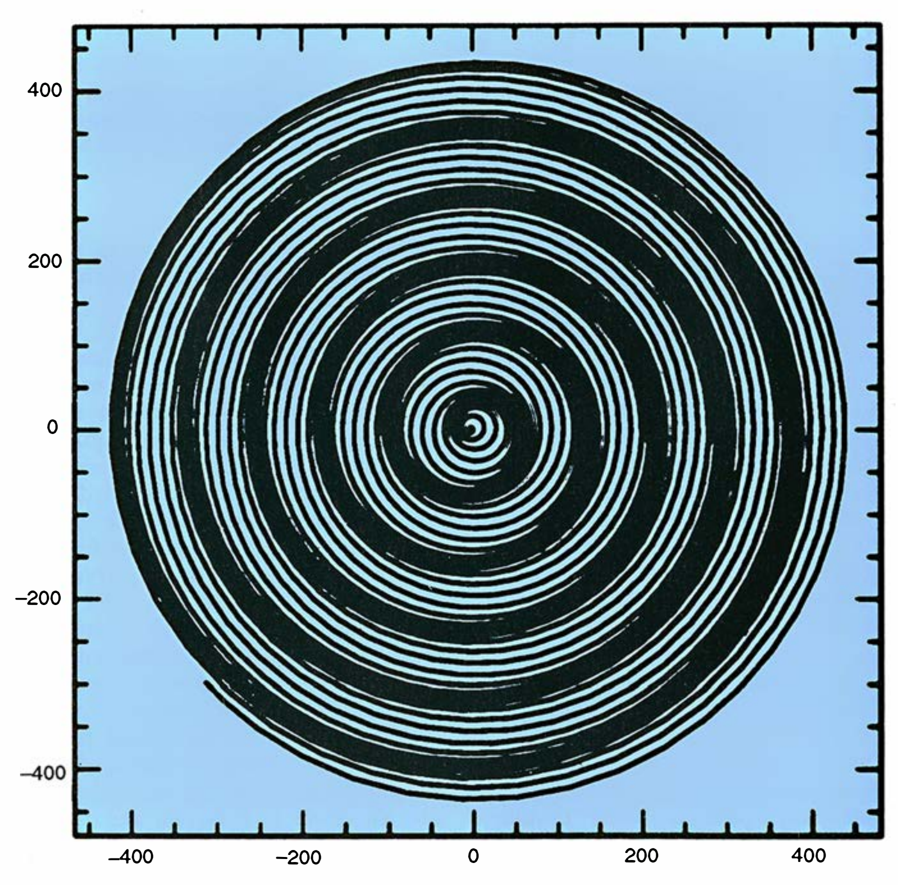
La superespiral puede considerarse el resultado de la aproximación entre frentes de onda de la espiral de base; el período de las ondas detectado en cualquier punto del medio cambia regularmente con el tiempo, es decir, puede verse como una sucesión de frentes que se acercan, para luego alejarse, y volver a repetirse la secuencia sucesivamente. Este acercamiento entre frentes y el cambio regular del período pueden entenderse en función del efecto Doppler bidimensional que se produce al recorrer la punta de la espiral el núcleo petaliforme.



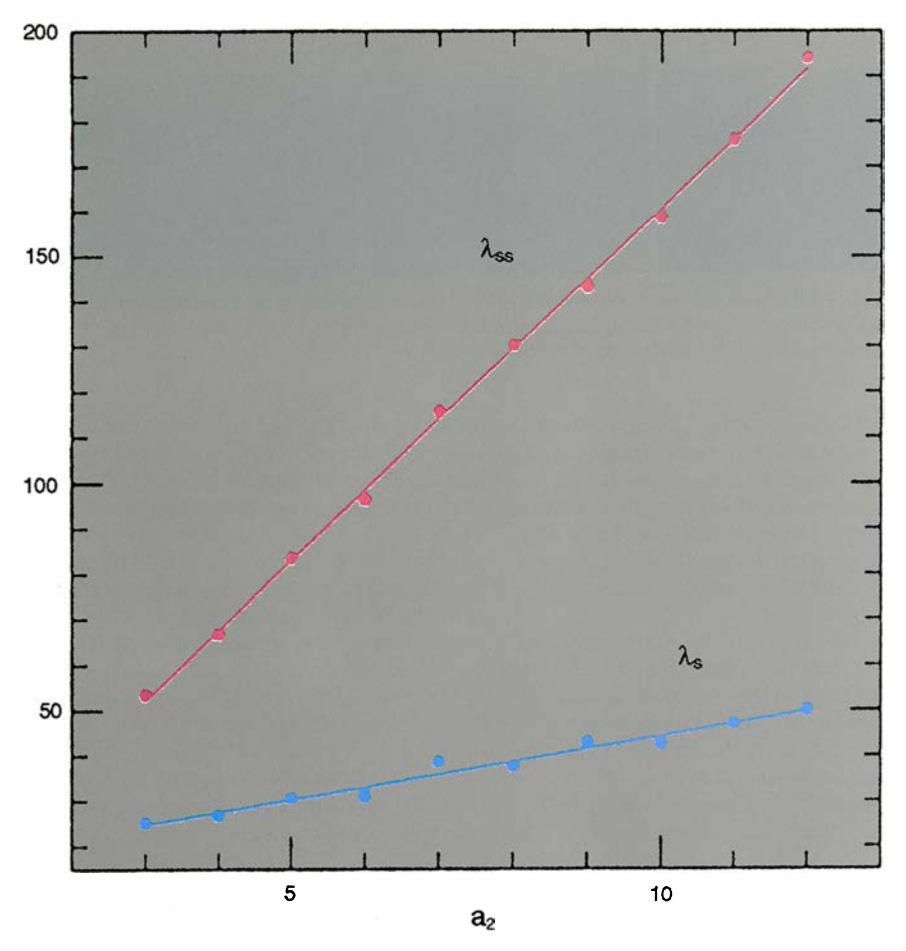
4. LA SUPERESPIRAL no desaparece con el tiempo, sino que gira acompasada a la espiral de base. Estas tres imágenes consecutivas temporales nos revelan que los extremos de ambas espirales siempre coinciden.

Las ondas espirales detectadas en la reacción química de Belousov-Zhabotinsky se han simulado mediante modelos simplificados de la cinética de la reacción. Estos modelos, llamados de reacción-difusión, están descritos por un sistema de ecuaciones diferenciales no lineales en derivadas parciales que pueden separarse en dos partes: en una, la reacción, que describe el comportamiento particular en un punto; y en la otra, la difusión, que tiende a homogeneizar todo el medio. Así, si se perturba una región, el efecto se transmitirá, por difusión, en todo el medio. Esta perturbación que se transmite recibe, en su forma más general, el nombre de frente de onda.

Si bien estos modelos son muy útiles para simular la dinámica de las espirales observadas en la reacción, no debemos olvidar que se trata sólo de modelos. Es decir, sus parámetros no están relacionados con magnitudes físicas medibles. Ello



5. SUPERESPIRAL obtenida con un modelo geométrico-cinemático de acuerdo con el cual la punta de la espiral sería fuente emisora de los puntos que conforman los frentes de onda con distintas velocidades, tantas cuantas frecuencias estén asociadas al sistema. Este efecto Doppler bidimensional da lugar a una superespiral que no desaparece lejos del centro y que mantiene las mismas propiedades que las observadas; su longitud de onda es varias veces superior a la espiral de base.



6. COMPORTAMIENTO LINEAL de la longitud de onda de la superespiral λ_{ss} al modificar la amplitud de los pétalos, a_2, de la trayectoria prefijada de la punta de la espiral. La línea inferior corresponde a los valores máximos de la longitud de onda, λ_s, encontrados para cada gráfica.

hace difícil poder controlar directamente la longitud de onda y el período temporal de las espirales simuladas. Si rebajamos, por ejemplo, el coeficiente de difusión, podemos pensar que, al propagarse más lentamente la perturbación, habría de conseguirse, en principio, que en un mismo espacio cupiesen más frentes de onda que antes. Sin embargo, debido al acoplamiento numérico entre las escalas espacial y temporal, implícito en los métodos clásicos de resolución de este tipo de modelos, lo que ocurre es que se dilata el ancho de los frentes.

Por consiguiente, esos modelos basados en una simplificación (modelización) de la cinética de la reacción de Belousov-Zhabotinsky no sirven para simular el efecto de superespiral, pues no debe olvidarse que se necesitan muchas vueltas de la espiral de base u original para representarla. Lo que nos indica que este tipo de modelos precisaría ingentes cantidades de memoria de ordenador para su simulación: deberían reservarse grandes espacios de memoria para que cupiera la parrilla bidimensional que representa el medio.

Para evitar estos problemas, en la Universidad de Santiago de Compostela hemos desarrollado un modelo de tipo geométrico-cinemático en el que la punta de la espiral sigue un movimiento predeterminado, resultante de la suma o diferencia de distintos movimientos armónicos de n frecuencias. Los puntos que configuran los frentes de onda (línea curva) de la espiral crecen a partir de uno (punta de la espiral) que sigue esa trayectoria. Las reglas de crecimiento vienen dadas por expresiones que relacionan la velocidad de los frentes de onda con la curvatura del frente. Esa relación, lineal, depende de la velocidad de un frente de onda plano, V_0, y de la difusión, D.

Con ello resulta muy sencillo estudiar los procesos en los que intervienen una, dos o más frecuencias en el movimiento de la punta, pues sólo habremos de cambiar el número de armónicos que intervienen en fijar la trayectoria que ha de seguir la punta de la espiral. En los últimos, la espiral se forma como consecuencia del enrollamiento de un extremo libre de un frente de onda anterior, proceso muy similar a lo que ocurre en la reacción de Belousov-Zhabotinsky, donde los frentes de onda que surgen de manera espontánea se rompen para producir la espiral.

Al estudiar con nuestro modelo el caso en el que la órbita predeterminada es sólo función de dos frecuencias, trayectoria petaliforme, la velocidad planar de los frentes de onda, V_0, presenta dos máximos: V_1 y V_2. V_1 corresponde al valor de V_0 en el que la punta emite puntos que configuran los frentes de onda desde la zona de máxima curvatura dentro de los pétalos, mientras que V_2 se corresponde con las posiciones externas equivalentes de la corola. Este efecto Doppler bidimensional es equivalente al que habíamos observado experimentalmente en la reacción de Belousov-Zhabotinsky. El resultado observado en nuestro modelo numérico se parece al experimental: forma asimétrica de la espiral de base, aproximación entre frentes de onda y aparición consiguiente de una superestructura.

Veamos ahora cómo varían los parámetros que definen la superespiral (período y longitud de onda) en función de la amplitud de los pétalos de la corola, a_2, o de su número. Estos resultados han recibido respaldo experimental en su mayoría. Al incrementarse la amplitud o frecuencia de los pétalos se ha observado un incremento lineal de la longitud de onda de la superespiral, λ_{ss}. El número de frentes de onda de la espiral original o de base que configuran un frente de la superespiral se ve incrementado proporcionalmente, al aumentar los frentes emitidos desde los pétalos, así como crece también el intervalo entre frentes de la superestructura. Por otro lado, la longitud de onda media de la espiral de base resulta ser proporcional a πa_2, consecuencia típica en sistemas de reacción-difusión respecto a la proporcionalidad entre la longitud de onda de la espiral y la amplitud del núcleo emisor.

En cualquier sistema de reacción-difusión en el que una perturbación se propague en forma de un frente de onda, los frentes originados interaccionan entre sí localmente. Si un frente sigue a otro, éste no siente la presencia del anterior, siempre que la distancia que los separa sea mayor que el ancho de los frentes. En nuestro modelo no se ha tenido en cuenta

este efecto, ya que se supuso que la onda está representada por una línea curva con la forma del frente y en la posición de éste. Por tanto, la superespiral puede ser observada para todo el plano XY sin que desaparezca lejos del centro, tal y como ocurre experimentalmente. Este efecto, de considerarse en el modelo, vendría representado por una ecuación de dispersión que debería dar cuenta de la forma de V_0 en función de la longitud de onda λ.

Incrementando el número de frecuencias en el movimiento de la punta de la espiral, la trayectoria se complica cada vez más, a la vez que el comportamiento de la velocidad planar V_0 se vuelve más complejo y emergen nuevos tipos de superestructuras.

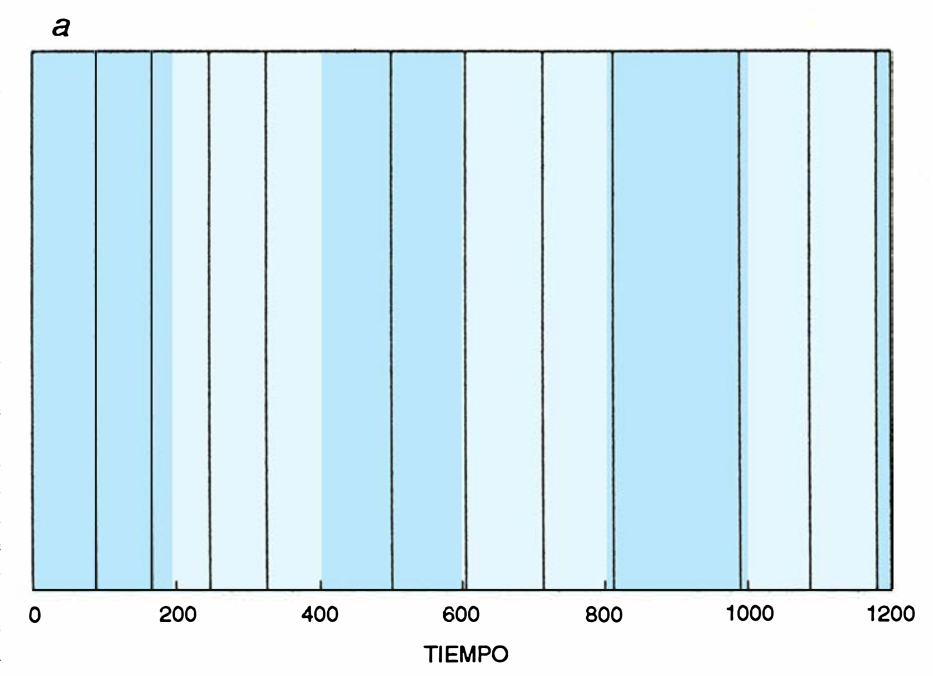
Existen, sin embargo, distintas maneras de incluir nuevas frecuencias en el modelo. Para el caso de tres frecuencias se ha supuesto que los pétalos se convierten, asimismo, en corolas. La creación del mismo motivo en una figura mayor introduce en el sistema una renormalización espacial (el mismo fenómeno se repite a distintas escalas) que conducirá a la asimetría de los frentes que configuran la superespiral, para sobre ella aparecer una nueva superestructura que llamamos super^2-espiral. Otras posibilidades de inclusión de una tercera frecuencia conducen a diseños en los cuales los pétalos primitivos aparecen de distintos tamaños. En este caso, el motivo no se itera a diferentes escalas, y la renormalización espacial no se repite.

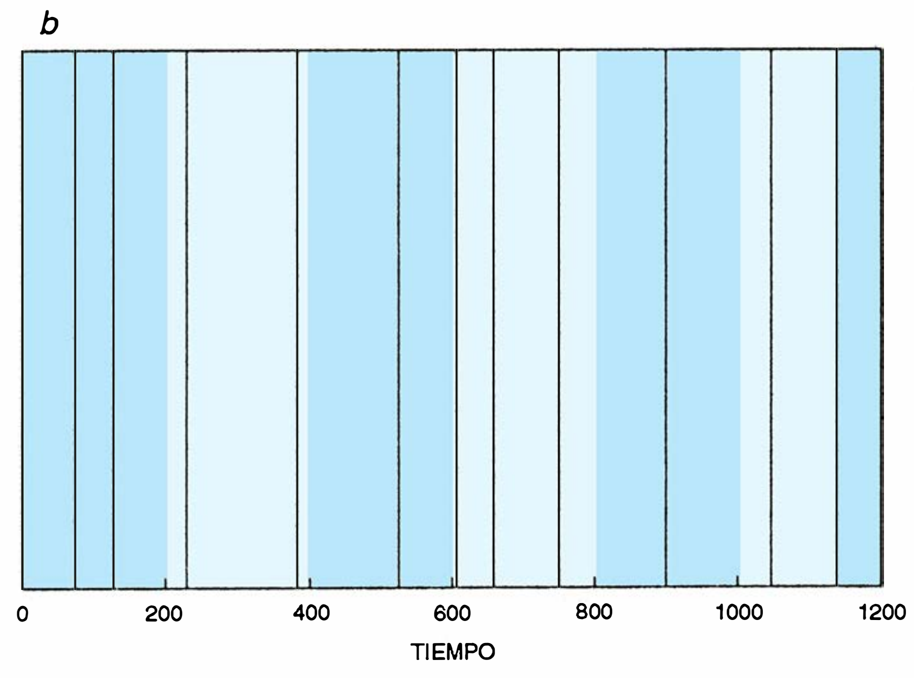
Como consecuencia del incremento del número de frecuencias que aparecen en el modelo, puede abrirse una ruta hacia el caos espacio-temporal por desestabilización de la frecuencia base original. Wolfgang Jahnke y A. T. Winfree llamaron hiperenvolvente ("hyper-meander") al efecto de la aparición de tres o más frecuencias en el movimiento de la punta. Ellos describen este fenómeno haciendo uso de un símil geométrico en el que la trayectoria seguida por la punta recorrería la superficie interna de un toro tridimensional que es estructuralmente inestable.

En nuestro sistema reactivo-difusivo, al incrementarse el número de frecuencias en la trayectoria petaliforme que recorre la punta de la espiral, sus frentes de onda tienden a acercarse en algunas direcciones, pudiendo llegar al rompimiento de algunos de ellos, formándose en cada extremo roto una nueva espiral que se esparciría por el medio.

Esta posible ruta hacia el caos espacio-temporal esbozada numéricamente como una consecuencia directa de los experimentos con superespirales en la reacción química de Belousov-Zhabotinsky es difícil de encontrar en el laboratorio. Aunque podría hacerse uso de un medio externo (campos eléctricos, magnéticos, láser de baja frecuencia, etc.) para generar las tres frecuencias mínimas necesarias en la trayectoria de una espiral simétrica con muchos frentes de onda presentes en el medio, que acabe por llevar el sistema al caos espacio-temporal.

Recordábamos al principio la presencia de estructuras espacio-temporales en la mayoría de los fenómenos naturales, estructuras que pueden reorganizarse en otras de compleji-





7. SUPERESPIRALES Y EFECTO DOPPLER BIDIMENSIONAL. Si se supone que los frentes de onda de la espiral arrancan de una fuente que gira alrededor de un círculo a velocidad constante V_2 y período T_{ss} y que la velocidad y período de las ondas emitidas son V_1 y T_s, entonces las posiciones de los frentes pueden representarse como en la figura: *a* corresponde al caso experimental donde los puntos se han tomado cerca del centro de la espiral; *b* corresponde a la simulación de este efecto Doppler bidimensional. El tiempo viene dado en segundos para ambos casos.



8. NUMERO DE FRECUENCIAS Y COMPLEJIDAD de las superestructuras. Incrementando el número de frecuencias que aparecen en el modelo geométrico-cinemático podemos obtener superestructuras cada vez más complejas en las que sus espirales de base serían, a su vez, superestructuras de un orden más bajo. Equivalentemente, en un sistema excitable no lineal, en el que los frentes de onda posean cierto tamaño y su movimiento venga condicionado por la presencia del inmediatamente anterior y posterior, y crezca el número de frecuencias del sistema, los frentes pueden romperse, produciendo, cada uno de ellos, pequeños vórtices que tenderían a expandirse por todo el medio debido a la interacción sucesiva entre ellos. Este tipo de dinámica irregular en el espacio y en el tiempo, también conocido como caos espacio-temporal, es el que se representa en esta figura.

dad creciente. Aquí hemos estudiado el caso de la reorganización de espirales en superespirales. (La presencia de las primeras en un corazón que sufre taquicardia pondera la necesidad de entender la dinámica de tales estructuras.) Bajo ciertas condiciones aparecen superespirales, cuando se dan dos o más frecuencias en la trayectoria seguida por su punta. Hemos expuesto la posibilidad de la desestabilización de las propiedades intrínsecas del vórtice original, cuando se traspasa el límite del caos espacio-temporal.

La posibilidad de controlar la dinámica de las espirales mediante mecanismos externos abre un horizonte de posibilidades en física, medicina y química. En el departamento de física de la materia condensada de la Universidad de Santiago de Compostela estamos desarrollando un ambicioso programa, numérico, teórico y experimental, de investigación de esas estructuras, su reorganización y su comportamiento ante perturbaciones externas en condiciones dispares que nos acerquen de manera verosímil a los procesos naturales.

BIBLIOGRAFIA COMPLEMENTARIA

SYNERGETICS. H. Haken. Springer-Verlag. 1983.

FOUNDATIONS OF SYNERGETICS I. Distributed Active Systems. A. S. Mikhailov. Springer-Verlag. 1990.

MATHEMATICAL BIOLOGY. J. D. Murray. Springer-Verlag (Biomathematics Texts). 1989.

THE GEOMETRY OF BIOLOGICAL TIME. A. T. Winfree. Springer-Verlag, Berlín, Heidelberg, Nueva York; 1980.

SUPER-SPIRAL STRUCTURES IN AN EXCITABLE MEDIUM. V. Pérez-Muñuzuri, R. Aliev, B. Vasiev, V. Pérez-Villar y V. I. Krinsky en *Nature*, vol. 353, págs. 740-742; 24 de octubre de 1991.

Ciencia y empresa

Aluminosis

Usos y abusos del cemento

Recientemente, varios accidentes en edificios han puesto de actualidad los hormigones fabricados con cemento aluminoso. Se ha dicho que estos hormigones padecen una enfermedad, bautizada con el nombre de aluminosis por la prensa sensacionalista, y se ha generado un clima de intranquilidad alrededor de tales construcciones.

Pero la aluminosis no constituye ninguna enfermedad del hormigón. Antes bien, se trata de una forma natural de evolución, igual que en las personas la madurez no se considera una enfermedad, sino una etapa más de su desarrollo. El comportamiento de los hormigones con cemento aluminoso se conoce bastante bien y pueden evitarse los accidentes si se toman precauciones.

Los hormigones son materiales compuestos por áridos, arena, cemento y agua. La pasta inicial endurece a temperatura ambiente, transformándose en un material pétreo de características similares a las rocas. Este proceso de endurecimiento, que no requiere grandes gastos energéticos a través de hornos, ni altas temperaturas —como la cerámica o algunas rocas—, lo hace muy atractivo económicamente como material de construcción y se utiliza desde hace mucho tiempo. Los griegos y los romanos usaban como conglomerante una mezcla de cal con cenizas volcánicas, que incluso endurecía bajo el agua. Los griegos obtenían las cenizas de la isla de Santorini y los romanos de Pozzuoli, cerca de Nápoles, de donde deriva el nombre de puzolanas para cementos con propiedades similares. La incorporación masiva de hormigones fabricados con cemento artificial se inicia a mediados del siglo pasado con la introducción del cemento Portland.

El cemento Portland es un conglomerante hidráulico que se basa en la hidratación de silicatos de calcio. El cemento aluminoso es otro conglomerante hidráulico fundado en la hidratación de aluminatos de calcio. Se desarrolló en Francia, a principios de siglo, como solución a la poca resistencia de los hormigones fabricados con cemento Portland frente a la acción del agua de mar y a los terrenos yesíferos. En aquel entonces no se conocían las ventajas de los cementos Portland con bajo contenido en aluminato tricálcico. Los cementos aluminosos mostraron una excelente resistencia a los sulfatos junto con otras propiedades interesantes, en particular, la de altas resistencias al cabo de poco tiempo. En efecto, porque alcanzan en un día la misma resistencia que se obtiene al cabo de un mes en un hormigón con cemento Portland, se ganó el interés de la industria de la prefabricación.

Pero estos hormigones tienen sus limitaciones, que es preciso conocer. El proceso de conversión es una de ellas, y consiste en la transformación de los aluminatos de calcio hidratados hexagonales (que son metastables) en aluminatos de calcio hidratados cúbicos (que son estables) y en la cristalización del gel de alúmina. Estas transformaciones van acompañadas de un aumento de la porosidad del hormigón —que lo hace más vulnerable— y de una disminución de su capacidad resistente, pudiendo llegar al 75 por ciento de su resistencia inicial. El proceso de conversión puede estar favorecido o retardado por diversos agentes; la velocidad del proceso es lenta por debajo de 25 grados Celsius y se acelera al subir la temperatura y en presencia de agua o de humedad. También se ha observado que valores bajos de la relación entre agua y cemento —por debajo de 0,4—, aunque no evitan la conversión, proporcionan valores de la resistencia residual superiores a cuando se utilizan relaciones más altas.

Otra limitación de los cementos aluminosos es la llamada hidrólisis alcalina, que consiste en la transformación de los aluminatos hexagonales en carbonato cálcico y aluminato alcalino por el dióxido de carbono de la atmósfera, en presencia de carbonatos alcalinos que actúan de catalizadores del proceso. Por ello es importante que los áridos utilizados estén libres de materiales finos que puedan aportar álcalis y que el cemento no esté contaminado por cemento Portland que puede proporcionar carbonatos alcalinos. Esta hidrólisis alcalina origina un aumento de porosidad y una disminución de la capacidad resistente, como en el proceso de conversión anteriormente comentado.

Este comportamiento de los hormigones fabricados con cemento aluminoso es conocido desde hace tiempo y se ha tenido en cuenta en la normativa de cada país. Hay fallos documentados que datan de los años treinta, y se refieren a distintos tipos de estructuras. Siempre se han atribuido a una pérdida de resistencia del hormigón por el fenómeno de conversión y, en algunos elementos armados, a la corrosión de las armaduras por la escasa protección proporcionada por el hormigón poroso. Las normas y las recomendaciones oficiales pretenden acotar la extensión de estos fenómenos y establecer unos márgenes de seguridad dentro de los que debe moverse el proyectista y el constructor. La instrucción española para el hormigón armado de 1973 (EH-73) ya exponía en qué situaciones se aconsejaba el uso del cemento aluminoso e incluía un anejo de recomendaciones que se ha recogido íntegro en la vigente instrucción (EH-91). Para estructuras de hormigón pretensado se prohíbe el uso del cemento aluminoso a causa de la mayor vulnerabilidad de las armaduras que están tensadas. La primera advertencia de un organismo internacional data de 1969 y la prohibición en España apareció en 1977 en la primera instrucción para el proyecto y ejecución de obras de hormigón pretensado (EP-77).

El hormigón con cemento aluminoso puede utilizarse sin riesgos si se cumplen las normas establecidas y se siguen las recomendaciones oficiales (EH-91) para componentes, dosificación, fabricación y mantenimiento, pero no debe emplearse en elementos pretensados. El cálculo de elementos estructurales debe basarse en la resistencia residual y no en los altos valores iniciales; y cuando se trate del mantenimiento de una estructura ya construida, será preciso realizar un diagnóstico del grado de conversión y a partir de ese dato decidir su refuerzo o su demolición.

El cemento aluminoso es distinto del cemento Portland, con sus ventajas e inconvenientes. Se trata de un material muy útil para reparaciones temporales, para taponar fugas de agua, y muy resistente a determinados agentes agresivos. Además, permite fabricar hormigones refractarios que, con la adecuada selección de los áridos, pueden usarse hasta a

1600 grados Celsius. A estas temperaturas se comporta como un material cerámico, y no como un cemento hidráulico, dejando de ser un problema la conversión.

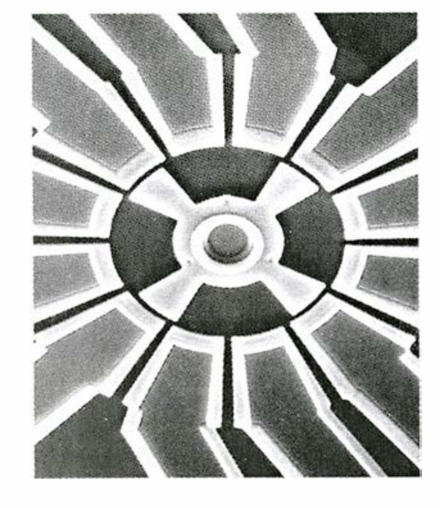
Como se ha indicado al comienzo, la aluminosis no es una enfermedad de los hormigones fabricados con cemento aluminoso, sino una forma natural de evolución. Igual que en un organismo vivo, el envejecimiento se puede acelerar o retrasar según la vida que haya tenido —humedad, temperatura y otras condiciones ambientales— y su dotación genética —dosificación de cemento, relación agua/cemento y otros datos de fabricación—. Para poder predecir el comportamiento de estos hormigones lo aconsejable es recurrir al diagnóstico de buenos especialistas —el fabricante del cemento o la Agrupación de Fabricantes de Cemento de España (IECA/OFICEMEN)—, quienes actuando como pediatras o geriatras establecerán la terapéutica más adecuada. (Manuel Elices Calafat, director del departamento de ciencia de materiales en la Escuela Técnica Superior de Ingenieros de Caminos de Madrid.)

Biomecánica

Miniaturización

Qué puede hacer nadie con un motor cuyas partes móviles no son más anchas que el grueso de esta página. Un motor de 100 micrometros podría mezclar, *in situ*, diminutas cantidades de fármacos de vida muy corta o, con más optimismo, rascar las placas de las arterias. De esa suerte son los micro Roto Rooters originales creados por Mehran Mehregany, de la Universidad Case Western Reserve.

A principios de año, Mehregany puso sus rotores de miniatura a los pies de los caballos: ante los salvajes torrentes fluidos del cuerpo humano. Por primera vez, él y sus colaboradores de Western Reserve demostraron que los micromotores podían vencer el intenso rozamiento viscoso de un líquido y continuar girando durante varias horas. Comprobaron que un campo eléctrico podía producir un par de giro suficiente, a través de dos micrometros de aceite aislante de silicona o de agua desionizada, para mover un rotor cuyo diámetro abarca el grueso de un cabello.



El éxito del grupo de Case Western no estaba, ni de lejos, cantado. Cuando Vijay Dhuler, alumno de los cursos de licenciatura, introdujo el año pasado el primer micromotor en agua y le aplicó una tensión, el motor se negó a girar. Mehregany supuso que el líquido que rodeaba el motor había sido incapaz de penetrar en el hueco de 1,5 micrometros entre el rotor y el substrato de silicio al que está conectado mediante un cojinete. Bastaba la tensión superficial entre el líquido y la minúscula bolsa de aire para mantener el agua alejada y el rotor agarrotado.

A fin de conseguir que el líquido penetrara, por difusión, en el hueco, Duhler aspiró aceite de silicona hacia el interior de una micropipeta. Sin sacar los ojos del microscopio, dejaba fluir lentamente el líquido de un lado del rotor al otro. Tras el ensayo, el rotor ha funcionado hasta cuatro horas en el aceite, girando tranquilamente a 15 revoluciones por minuto.

La microfotografía del motor de Mehregany (fotografía) nos trae a la memoria la imagen de las primeras máquinas de la revolución industrial. El motor comienza a girar cuando se aplica una tensión a uno o más de los 20 elementos del estator, o polos, que rodean el rotor de cuatro palas. Estas estructuras, de sólo un micrometro de grosor, funcionan como un motor eléctrico convencional, con la salvedad de que se apoyan en la electricidad estática, no en las fuerzas magnéticas. El campo creado a través del hueco provoca que cada pala del rotor se alinee con cuatro de los polos del estator. El proceso se repite cuando la tensión se aplica a otros polos, haciendo girar el rotor.

Estrechando la parte del cojinete que soporta el motor, Mehregany dividió por tres el rozamiento medido como porcentaje del par motor. Las nuevas máquinas que operan en el aire pueden girar durante días al ritmo más que respetable de hasta 15.000 revoluciones por minuto.

Para las micromáquinas sumergibles se anticipan unas mejoras parecidas en sus prestaciones. Los líquidos presentan una ventaja sobre el aire: sus propiedades dieléctricas aumentan la energía del campo eléctrico y consiguientemente el par de giro. Por desgracia, esta ventaja queda más que compensada por el rozamiento viscoso del medio.

Estamos todavía lejos de poder asistir al funcionamiento rutinario de esos artilugios. Lograr que los motores actúen en la sangre, cuya conductividad eléctrica debilita la intensidad del campo, es todavía un sueño. En el aire, el máximo par producido por las máquinas de Mehregany es de unos 50 piconewton-metro. En comparación, una hormiga caminando por un brazo descubierto semejaría las pisadas de un *Tyrannosaurus rex*.

Aerogeles

Economía del plástico

Hace unos años, los investigadores del Laboratorio Nacional Lawrence en Livermore mostraban ufanos a los visitantes ciertos encajes de sílice muy finos: los aerogeles. Parecidos a la niebla helada, los aerogeles pesan unas cuatro veces más que el aire y son casi transparentes. Merced al aire ocluido en su estructura, poseen unas magníficas propiedades aislantes. Con una capa de cinco milímetros de espesor, queda protegida la mano que trabaja con la llama de una lámpara de soldar.

Sus creadores citaban, y no paraban, una larga lista de aplicaciones potenciales, desde el aislamiento térmico en los frigoríficos hasta las ventanas herméticas. A pesar de ello, los aerogeles están encontrando dificultades para abrirse camino en aplicaciones rutinarias: sólo se han venido utilizando como detectores de partículas en los laboratorios de investigaciones físicas. El problema de siempre en los materiales de altas prestaciones reside en su elevado coste. Un experto del Livermore acaba de proponer una opción alternativa más barata: aerogeles orgánicos basados en los monómeros de uso en la fabricación de plásticos.

Los aerogeles orgánicos aíslan el calor con la misma eficacia que sus homólogos inorgánicos, amén de poseer otras seductoras características propias, expone Richard W. Pekala, director de la sección de materiales poliméricos del Livermore y creador de los compuestos. El rojo oscuro es,

afirma, el mejor termoaislante. Ofrece también variedades negras y transparentes. Esta última, idónea para ventanas, no desmerece de la roja, aunque se halla todavía en fase experimental. El aislante de color no supondría ningún problema en el interior de un refrigerador o estufa.

Por cocción del rojo se fabrica el aerogel negro, al quedar sólo carbono puro. Por constituir un eficacísimo conductor de la electricidad, se está sometiendo a prueba ese material en condensadores de almacenamiento de energía eléctrica. Su estructura porosa le capacita para retener una carga mucho mayor que las películas de carbono sólido empladas en los condensadores tradicionales. Y se habla de introducir esos condensadores en los vehículos eléctricos.

Pekala sintetiza aerogeles orgánicos polimerizando los monómeros con formaldehído mezclado con agua. La melamina produce un gel transparente; el resorcinol, rojo. Los compuestos se condensan, a partir de la solución, en agrupamientos que se organizan por sí mismos en una retícula estable.

El secreto de la fabricación de aerogeles, lo mismo inorgánicos que orgánicos, consiste en sacar el líquido del gel sin que se hunda la estructura. No podemos secarlo con aire porque el gel se contraería como un trozo de jalea que se dejase en el mostrador varios días. La tensión superficial del agua que se extrae arruinaría la estructura. El secado por congelación está también descartado, porque la dilatación causada por la congelación destruiría el delicado entramado.

La solución estriba en algo parecido a remover el mantel sin levantar la cristalería y porcelana suprayacentes. Primero, mediante difusión, se sustituye el agua por un disolvente orgánico (acetona), reemplazado a su vez por dióxido de carbono líquido. A continuación, se coloca el gel en un recipiente donde la alta presión transforma el dióxido de carbono en un fluido supercrítico que carece de tensión superficial porque no es ni gas ni líquido. A medida que va relajándose paulatinamente la presión, se gasifica el dióxido de carbono, dejando impoluto al aerogel.

Gracias al perfeccionamiento del proceso de secado se fabrican ya bloques de aerogeles de sílice de 6,5 decímetros cuadrados y 2,5 centímetros de espesor en una planta piloto. Pero el investigador que Pekala lleva dentro inquiere más allá, en los mecanismos físicos que se esconden tras los aerogeles orgánicos. "Apenas si hemos entreabierto la puerta. Hay reglas concernientes a estos geles que deben poder extenderse a otros materiales básicos con los que la gente está más familiarizada. Algún día veremos un aerogel de poliestireno", predice. El futuro de los aerogeles podría muy bien esconderse en los plásticos.

Botica de pueblo

El neem

Entre las primeras hojas en vestir las ramas que había dejado peladas la letal nube química que envolvió la fábrica de insecticidas de la Union Carbide en Bhopal, India, se encontraban las de un árbol alto y frondoso, emparentado con el caobo. La capacidad de supervivencia del neem, así llaman los lugareños al árbol, no sorprendió a los agricultores, ni a los constructores o curanderos hindúes, que se han beneficiado de sus notables propiedades durante siglos. Sus hojas, metidas en las páginas de los libros, entre las sábanas o en los graneros, ahuyentan los insectos. Se mezclan en el té para combatir la malaria. Se aprovecha su madera para combustible. Y de productos del árbol se fabrica jabón, aceite para lámparas o lubricante para engrasar las ruedas de las carretas.

Los primeros informes científicos, publicados en los años veinte, aparecieron fuera de los canales habituales de la investigación occidental. Pero la situación cambió en 1959, cuándo Heinrich Schmutterer, un entomólogo alemán, observó que los neem permanecían inalterados tras una plaga de langosta en el Sudán. Desde entonces, los trabajos sobre esa curiosa especie no han cesado.



Abundando en ello, el norteamericano Consejo Nacional de Investigación (NRC) acaba de editar *El neem: un árbol para resolver problemas globales*, revisión de los trabajos realizados hasta la fecha y donde se urge a superar la fase de aproximaciones anecdóticas para acometer una investigación sistemática.

De momento, ya ha salido al mercado el primer producto basado en el neem, un plaguicida comercializado por la firma W. R. Grace and Company. Los extractos de ese árbol son eficaces contra más de 200 artrópodos dañinos, entre ellos la mosca mediterránea de la fruta, la mosca común, las pulgas, los piojos, la polilla, el escarabajo de la patata, los gorgojos y las cucarachas.

La azadiractina, el compuesto más activo del neem, presenta un lejano parecido químico con los esteroides; quizá repele a los insectos o bien impide que sus larvas se desarrollen en pupas. Aunque pueden pasar semanas antes de que mueran los insectos, la substancia no comete "ecocidio" alguno en el proceso. Los pájaros y los murciélagos comen frutos del neem habitualmente, mientras que en los graneros de la India se añaden hojas de neem para evitar los gorgojos. La complicada constitución química del neem, que contiene más de 20 compuestos, reduce la probabilidad de que los insectos desarrollen resistencia.

Los beneficios medicinales del neem están menos claros. La terapéutica sánscrita, de mil años de antigüedad, alaba el árbol llamado *arishta*, término que significa aliviador de



Los árboles neem ayudan a la reforestación en Tailandia. El árbol da flores con perfume de miel y frutos que se parecen a las aceitunas (arriba). Fotos: W. R. Grace.

enfermedades. Las pruebas científicas son muy fragmentarias. Se ha escrito que el aceite de neem combate la *Salmonella* y los estafilococos, y se aplican pomadas en la piel para las víctimas de la varicela y verrugas. Los nativos de Africa y sur de Asia se restriegan los dientes y las encías con varillas de neem, que se ha llado matan las bacterias bucales. Durante siglos, se han venido ingiriendo extractos de sus hojas para combatir la malaria.

Competitividad

El síndrome del corto plazo

Durante años, la cantinela de la "falta de competitividad" de las empresas no ha dejado de oírse. Y entre las razones que suelen aducirse, se insiste en la miopía de buscar el beneficio a corto plazo a expensas del éxito industrial a más largo plazo.

Los expertos afirman que no hay muchas posibilidades de elección. Las decisiones de las empresas vienen dictadas por el agobiante coste del capital para futuras inversiones. Por eso, entre los remedios propuestos, se presenta una pródiga terapia de la administración que rebajara ese coste mediante desgravaciones de la inversión, impuestos más bajos sobre ganancias del capital, y así sucesivamente.

¿Qué ocurre en otros países, en Estados Unidos, por ejemplo? Allí, los tiempos y las condiciones del mercado han cambiado. Si las decisiones sobre inversión giran alrededor del coste del capital, los directivos norteamericanos deberían estar aportando dinero a la investigación y proyectos de capital a largo plazo, aprovechando el descenso de los tipos de interés y la brusca subida de los valores en bolsa. En términos generales, no lo están haciendo.

¿Por qué seguir entonces arrastrando los pies? Un informe publicado por la Academia Nacional de Ingeniería (NAE) el pasado marzo ofrecía una cruda explicación de la aversión endémica de las empresas a los compromisos a largo plazo: muchos directivos han perdido la sabiduría necesaria para calibrar el papel que las técnicas emergentes pueden ejercer sobre sus negocios, exagerando el riesgo de esos proyectos.

Si una empresa tropieza en el mercado porque su horizonte de inversión no va más allá de tres o seis meses, los culpables son el consejo de administración y los directivos de la empresa y no solamente los financieros de Wall Street, expone Donald N. Frey, profesor de la Univesidad del Noroeste y antiguo presidente de Bell & Howell, que encabezó también el comité de la NAE. (Entre los otros nueve componentes de éste se encontraban varios miembros de consejos de administración, presidentes de compañías, un conocido financiero y un profesor de una facultad de ciencias empresariales.)

El grupo de Frey extrajo sus conclusiones de las experiencias aportadas por los miembros del comité, así como de entrevistas con directivos de diversas empresas (pequeñas, medianas y grandes) de sectores competitivos que exigen una fuerte capitalización. Hallaron, por ejemplo, que sólo cinco de entre los 15 ejecutivos entrevistados creían que el coste del capital perjudicaba a los resultados de sus compañías; debemos añadir que los beneficios de esas cinco firmas quedaban muy por debajo de los beneficios medios de las otras diez compañías estudiadas.

A pesar de la importancia obvia del coste del capital a la hora de evaluar un proyecto, no lo es menos la ponderación de riesgos por parte de la dirección, la "prima de riesgo". Las empresas de larga experiencia en determinada técnica suelen percibir menos riesgos en los nuevos empeños que las que carecen de una historia sólida. La experiencia, y el éxito, preparan el camino de nuevos logros. Considérese, por ejemplo, las empresas de semiconductores que abandonaron el negocio de las pastillas de memoria hace algunos años, y que ahora están pensando volver a ese ruedo: los directivos considerarán tales planes mucho más arriesgados de lo que lo harán quienes persistieron compitiendo en ese mercado.

Hasta qué punto preciso deben extenderse los horizontes de inversión de las empresas es algo que varía de una industria a otra, señala el informe de la NAE. Unas técnicas maduran antes que otras y sobreviven durante más tiempo en el mercado. Según datos reunidos por James Brian Quinn, de la Escuela de Administración Amos Tuck en el Colegio Darmouth, los fabricantes de aviones se precian de largos horizontes de inversión porque se tarda ocho años en desarrollar un prototipo nuevo, que a su vez permanecerá activo durante más de 15 años. Un paquete informático ("software"), por el contrario, se puede desarrollar en dos años, y el ciclo de vida del producto es de otros dos. Para elegir estrategias productivas, los directivos deben tener un sentido intuitivo de los ritmos en sus industrias, olfato que sólo se educa con la experiencia.

Sin exonerar de responsabilidad a los directivos, el comité de la NAE reconoce que el gobierno federal podría hacer más para proteger a las empresas de las bruscas fluctuaciones de los beneficios a corto plazo. Hay un problema estructural en los EE.UU., el enorme hiato entre los propietarios y los directivos de las empresas, se lamenta. Los grandes accionistas, tales como los fondos de pensiones, pueden impulsar a los directivos de las empresas a hacer máximos los beneficios a corto plazo amenazando con vender grandes paquetes de acciones. Cuando el valor de éstas cae, los buitres de las corporaciones pueden empezar a planear.

Nadie duda de que los directivos pueden influir sobre el entorno, sobre todo si están capacitados para entender las nuevas técnicas y no cortan el contacto con sus accionistas. Pero si los inversores institucionales apuestan por los beneficios a corto plazo, ni los ejecutivos de la compañía ni el consejo de administración podrán soportar la presión.

Juegos matemáticos

Ian Stewart

Todos los caminos huyen de Roma

“Jamás habían contemplado los romanos un espectáculo semejante”, chanceóse Fastidius Tiquismiquis ante sus etilizados amigos, mientras se relajaban tomando unas copas en el Pub del Octógono.

“Vale ya, Fastidius, no seas peñazo. No aguanto que vuelvas a contar una vez más la misma historia”, exigió Barnamus Bailus, echándose al coleto un lingotazo de whisky de las Casitérides.

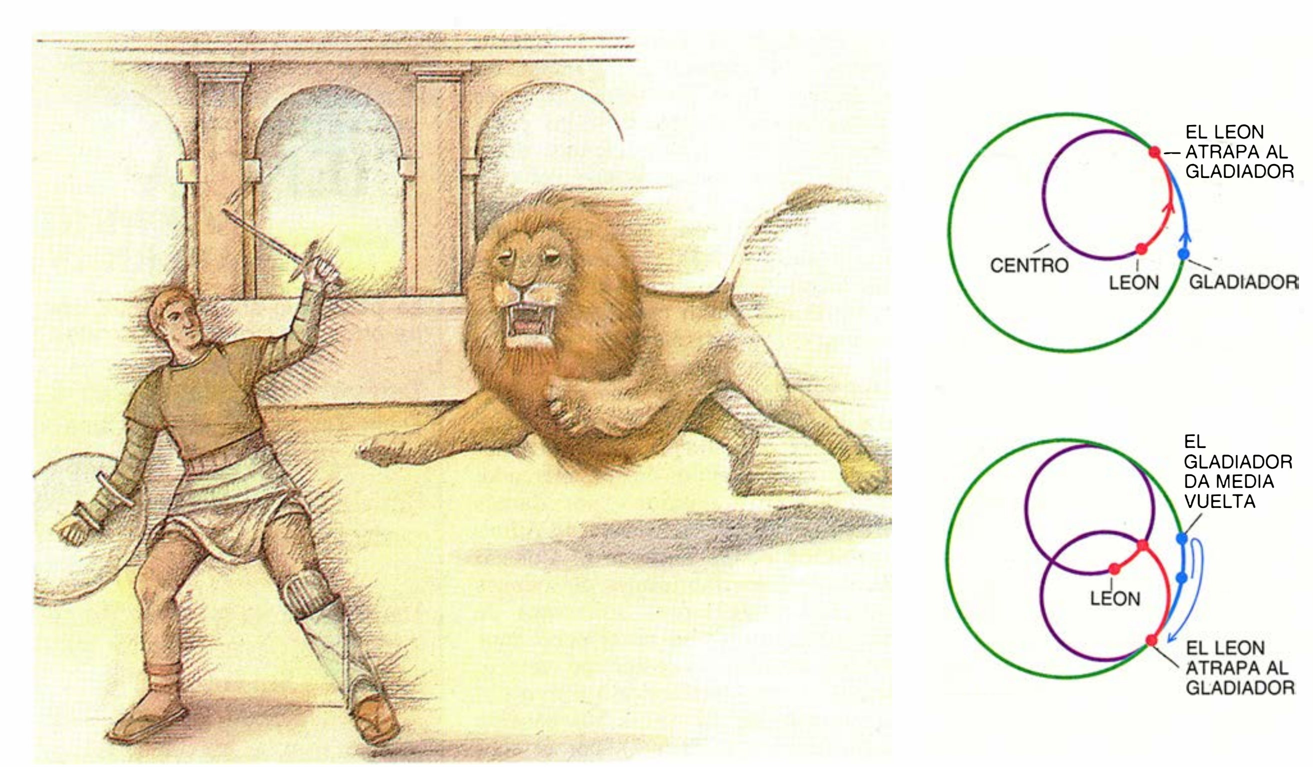
Fastidius no le hizo el menor caso. “Barnamus logró convencer a un guerrero galo medio loco para que se enfrentase a un león. Egocentrix, creo que se llama el tío. El caso es que va el galo y entra en el coso; los del circo le abren la jaula al león y la multitud se vuelve loca, presagiando un frenesí de sangre y vísceras. La fiera se arrastra acechante hasta el centro del redondel; Egocentrix se acerca al bicho espada en alto. Pero el felino se queda plantado, sin moverse. Entonces a Egocentrix no se le ocurre más que pincharle con la espada en el anca. El león ruge y acomete al gladiador. El guerrero, con el susto, deja caer la espada y sale por piernas. ¡Menudo fantasmón!”

“Egocentrix no es ningún cobarde”, saltó Barnamus. “Para empezar, tuvo lo que hay que tener para hacerle frente a un león armado sólo con una espada.”

“¡Por Júpiter tonante! ¿Y de dónde sacaste la idea de armar al león con una espada?”, se guaseó Fastidius. “Bueno, no importa; dejadme acabar la historia. Egocentrix corría por el albero como un eunuco descalzo sobre brasas ardientes. Hay que reconocer, eso sí, que el gladiador era más ligero de suelas que el león. En cuanto la fiera se le acercaba demasiado, el galo ponía pies en polvorosa. El león no tardó en cansarse de aquel juego idiota. Dejó de perseguir al hombre, se hizo un ovillo en el suelo y se puso a dormir. Egocentrix quedó jadeante en medio del coso. Al principio el público se impacientó, pero luego lo tomó a guasa y se puso a corear, ‘Salve, Egocentrix, hipnotizador de leones’.”

Todos los amigos de Fastidius soltaron la carcajada, excepto Nobelina, la preceptora de geometría del emperador.

Fastidius tomó un sorbito de agua “light” y prosiguió. “Al terminar los juegos me pareció oír al emperador Escándalus que la lid había sido más



1. *EL LEON puede siempre alcanzar a un gladiador que corra en círculo si ambos se mueven a la misma velocidad* (diagrama superior derecho). *Si el gladiador invierte el sentido de su carrera, el león modificaría su táctica en consecuencia* (diagrama inferior derecho).

aburrida que una sesión ordinaria de la Sociedad de Ingenieros de Acueductos."

La faz de Barnamus hacía oscuro al papel. "Mucha suerte me va a hacer falta para no acabar de pasto de leones."

"Pero Barnamus, en realidad no ha sido culpa tuya", terció Nobelina. "Y me parece saber una forma de dar más interés a los juegos."

Barnamus lanzó un salivazo al piso polvoriento. "¡Qué sabrá de juegos una geómetra! ¡Date el bote, cara de transportador!" Se volvió para dirigirse a Fastidius. "Estoy trabajando con un amigo para lograr que una docena de leones..."

Pero Nobelina no cejó. "Mira, Barnamus, tu error no estuvo tanto en el león como en el gladiador. No puede haber mucho espectáculo en la pelea, si el guerrero es más rápido que el león."

"Lo que Nobelina quiere decir", tradujo Fastidius, "es que si la velocidad del hombre es mayor que la de la fiera, el luchador podrá siempre escapar de las —¡ay, qué risa!— las garras de la muerte."

"La verdad es que existe incluso una demostración geométrica sencilla de ese teorema", añadió Nobelina. "Salvo en el caso, claro está, de que uno suscriba las paradójicas teorías de Zenón de Elea, filósofo griego que vivió unos cuatrocientos años antes del reinado de Gaius Julius Caesar.

"A Zenón se le ocurrió un brillante razonamiento, que según él demostraba la imposibilidad de todo movimiento. Si el espacio fuese infinitamente subdivisible, una longitud finita contendría una infinidad de puntos. Y sería imposible iniciar movimiento alguno, pues para pasar de un punto a otro tendríamos siempre que recorrer un número infinito de puntos intermedios. Con otras palabras, lo que Zenón proponía es que haría falta un tiempo infinito para cubrir un número infinito de puntos, o lo que es igual, para movernos una distancia finita."

"Tengo la impresión de que el león de Barnamus está familiarizado con la obra de Zenón", retrucó Fastidius.

"¡Ya está bien de bobadas!", exclamó Barnamus. "Para la semana que viene he programado que sea Geriatrix quien se enfrente al león. Geriatrix apenas logra trastabillar una docena de pasos."

"No habrá mucho que ver si el león corre más que el gladiador", hizo notar Nobelina.

"Tú no metas la nariz en esto", dijo Barnamus, amenazante.

"Yo creo que Nobelina tiene razón. Un par de zarpazos, unas cuantas dentelladas y todo habrá terminado", dijo Fastidius con hastío en la voz. "Barnamus, es preciso que encuentres un león y un guerrero perfectamente igualados, capaces ambos de correr a la misma velocidad, para que ninguno disponga de ventaja obvia. Entonces tendremos por fin una auténtica pelea."

"Yo no estaría tan segura de eso", incidió Nobelina.

"¡Por Hera, la tía ésta vuelve a la carga!", tronó Barnamus.

"Me pregunto qué ocurrirá si el luchador emula lo que Egocentrix hizo hoy y huye del león lo más rápido que pueda."

"Pues que el león correrá detrás de él", dijo Fastidius.

"Así sería, en efecto", reconoció Nobelina, rascándose perpleja el cogote. "Y lo haría a la misma velocidad, con lo cual, aunque la distancia que los separa no aumenta, tampoco se reduce. A mi modo de ver, no resultaría una batalla táctica demasiado apasionante."

"Sería un pelín aburrida, sí", concedió Fastidius. "Pero el gladiador no puede huir indefinidamente: para eso está la barrera del coso."

"Excelente observación", otorgó Nobelina. "Lo que plantea un problema de cierto interés. Si un león persiguiera a un guerrero por una arena circular, y si cada uno de ellos corre a la misma velocidad constante, ¿podrá siempre el león atrapar al guerrero? O bien, por el contrario, ¿podrá el gladiador, mediante sagaces regates y cambios de dirección, mantener indefinidamente a distancia al león?"

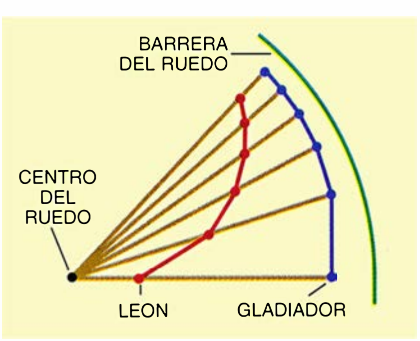
"A mí me parece que en cuanto el gladiador cambie de dirección, el león podrá atajar y reducir un poco la distancia que los separa", replicó Fastidius.

"Cierto", concedió Nobelina. "Pero si el gladiador no cambia de dirección brusca sino progresivamente y el cambio de dirección en cada instante es infinitesimal..."

"Bueno", dijo Fastidius con cierta irritación. "Me parece a mí que si el león se mantiene siempre entre el gladiador y el centro del coso..."

"¿Quieres decir que se sitúa sobre el radio que une al luchador con el centro del redondel?", preguntó Nobelina.

"Exactamente. Si el león actuase de esa forma, podría ir llevando al gladiador contra el muro y atraparle



2. LA ESQUIRAL es la base de una estrategia que ayuda al gladiador a escapar del león. Para describir una trayectoria esquiral, el gladiador imagina una recta que pase por él y por el centro del ruedo. Corre perpendicularmente a esa recta un breve trecho. Para cada movimiento posterior continúa imaginando rectas que pasen por el centro y seguidamente viaja perpendicularmente a ellas una distancia igual a la primera multiplicada por n *elevado a –0,75.*

allí. El arco de círculo que el león ha de recorrer es menor que el del gladiador, por lo que dispone de velocidad sobrante para ir reduciendo la distancia en sentido radial. Ello se debe a que, por así decirlo, el león va por dentro del gladiador."

"¡Y poco después el gladiador irá por dentro del león!" Barnamus chasqueó la lengua, satisfecho de su propio chiste.

Pero a Nobelina no le hizo gracia. "Excelente sugerencia, Fastidius. Empero, sigo preguntándome si no podrá ocurrir que —como razonaba Zenón— el león se acerque indefinidamente al gladiador sin llegar nunca a alcanzarle del todo. La ventaja de la mayor velocidad radial va reduciéndose conforme el león tiende hacia el guerrero. Vamos a ver... Supongamos para mayor sencillez que el guerrero corre en círculo. El león podría entonces recorrer un círculo más pequeño que fuese tangente a aquél."

Nobelina trazó un sencillo diagrama en el suelo polvoriento. "En geometría elemental se demuestra que los arcos correspondientes de las dos circunferencias poseen idénticas longitudes, así que la trayectoria es posible. En cuyo caso, el león alcanza realmente al gladiador al cabo de un período finito de tiempo." Sentenció con tono profesoral.

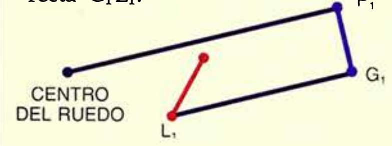
"Geometría elemental...", rezongó Barnamus. "Ningún gladiador es tan tonto que siga corriendo en la misma dirección al ver que se le echa encima un león rugiente. ¡Dará media

Una estrategia de fuga

El gladiador puede siempre evitar ser capturado por el león si corre a la misma velocidad que el felino y aplica la estrategia siguiente. Supongamos que el gladiador parte de la posición G_1 del coso y que el león parte de la posición L_1.

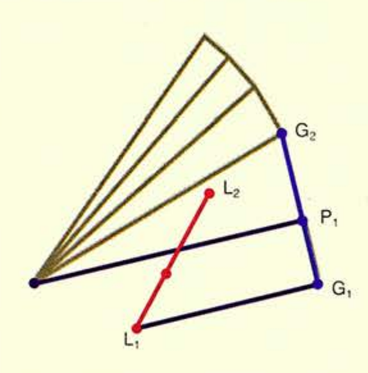
PRIMER PASO

El gladiador corre perpendicularmente a la recta G_1L_1 hasta alcanzar el punto P_1, que es intersección de su trayectoria con el radio paralelo a la recta G_1L_1.



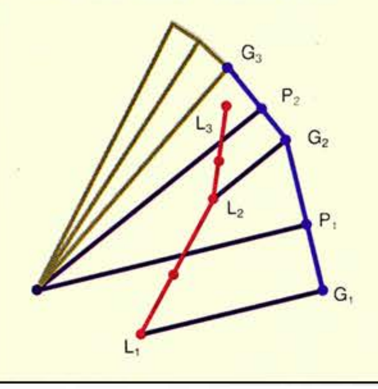
SEGUNDO PASO

El gladiador rebasa el punto P_1 en una distancia igual a la longitud del primer segmento de la esquiral. Entretanto, el león ha llegado a la posición L_2.



MOVIMIENTOS POSTERIORES

El gladiador corre perpendicularmente a la recta que une G_n con L_n, y continúa después hasta rebasar P_n en una distancia igual a la del n-ésimo lado de la esquiral. Al proceder así, el guerrero no caerá nunca en las fauces del león.



vuelta y huirá en dirección contraria!"

"¡Pero también el león puede cambiar de dirección! ¡Bastará con que su nueva trayectoria sea reflejo de la que estaba siguiendo respecto de un espejo radial correspondiente al punto de inversión del movimiento!", exclamó Nobelina con aire triunfal. "¡Barnamus, tienes que procurarte un león cuya velocidad sea exactamente igual a la de tu luchador más hábil, y adiestrar a la fiera para que se mantenga en el mismo radio que el gladiador al tiempo que le persigue. Podrías así ofrecer a las multitudes un espectáculo apasionante, con el gladiador huyendo aterrorizado de acá para allá tratando de huir de las garras de la feroz bestia. Al final, forzosamente habrá de plantar cara y luchar."

"No es mucho lo que pide Nobelina, ¿verdad?", suspiró Barnamus. Salió a trompicones del pub, preguntándose si el plan de Nobelina serviría de algo.

Con sólo siete días de margen hasta los próximos juegos, Barnamus no perdió tiempo en realizar pruebas de velocidad con sus leones. Al final descubrió uno capaz de correr tan rápidamente como Egocentrix. Se apresuró a adiestrar al animal, gratificándolo con carne fresca de gacela en recompensa por atenerse a la estrategia de persecución radial sincronizada. Al séptimo día, el león estaba más entrenado que la mayoría de los gladiadores.

Barnamus, ufano de su logro, contrató tres pregoneros más para anunciar la lucha. Una enorme muchedumbre se congregó en el coliseo. Egocentrix entró en el coso e hizo una reverencia ante el palco del emperador. La jaula del león fue transportada hasta el centro de la arena mediante una especie de grúa y abierta. El león se lanzó en derechura hacia Egocentrix, quien lanzó un chillido y salió disparado en dirección perpendicular a la trayectoria del león. Este, de acuerdo con su adiestramiento, giró para mantenerse en el mismo radio que Egocentrix, quien al observar la maniobra volvió a girar un ángulo recto con respecto a la direción del radio. El león fue reduciendo la distancia que les separaba, pero su aproximación iba a ritmo más y más lento.

"Pero... ¿qué está haciendo ese bobo?", preguntó Fasitidius.

"No tengo ni idea", respondió Barnamus. "De lo que no hay duda es de que el león está persiguiendo al galo con auténtica obsesión."

Nobelina se dio una palmada en la barbilla. "Es obvio. Egocentrix está siguiendo una esquiral, una espiral formada por segmentos rectilíneos sucesivos, cada uno en ángulo recto con el radio. Podemos ahora demostrar mediante argumentos geométricos sencillos que, si el león se mantiene en el radio que une a Egocentrix con el centro del ruedo, el león no podrá alcanzarle mientras el galo esté corriendo a lo largo de un segmento concreto. Por consiguiente, el león no puede alcanzarle, aunque sí acercársele tanto como se quiera."

"Pero si Egocentrix va siempre —¿cómo diríamos... 'esquiraleando'?— hacia el exterior es forzoso que habrá de llegar a la barrera", objetó Fastidius.

"No necesariamente", afirmó Nobelina. "Si la componente radial de la distancia va incrementándose en distancias más y más pequeñas puede evitar el llegar a la pared. Estoy pensando en una serie geométrica del tipo

$$1 + {}^1/_2 + {}^1/_4 + {}^1/_8 + \ldots$$

que nunca supera el valor 2, por muchos que sean los términos que se sumen."

"Pero, en tal caso, el movimiento del gladiador por la circunferencia del coso también habrá de mantenerse inferior a una cierta cota, por lo que el león pronto le alcanzaría", interpuso Fastidius.

"Me temo que no", replicó Nobelina. "Si la longitud del n-ésimo segmento de su trayectoria es proporcional a, sea por caso, la raíz cuarta del cubo del recíproco de n, un breve cálculo demuestra que la distancia radial se conserva acotada, mientras que la distancia angular, por el contrario, puede exceder de cualquier cantidad dada. Lamento decir que Egocentrix puede proseguir indefinidamente su trayectoria esquiral sin llegar nunca a la barrera ni ser atrapado por el león."

Un mensajero dio a Barnamus unos toquecitos en el hombro. "El emperador desea hablaros."

Barnamus partió con el mensajero y retornó algunos minutos después, más blanco que la tiza. "¡Tienes que ayudarme, Nobelina! ¡Ahora tengo que desentrenar al león para que sea libre de seguir sus propias inclinaciones! ¡Y lo peor de todo es que el emperador ordena que sea yo quien me enfrente al león la semana que viene!"

"Es lástima que corras exactamente a la misma velocidad que el león", comentó Nobelina.

"Así lo han querido los dioses. Ya sabía yo que debía haber hecho una ofrenda más generosa a las vírgenes vestales.... ¡Nobelina, ayúdame, por favor!"

"Bueno, ya no puedes seguir una esquiral, porque ahora el león puede atajar en los ángulos. Pero quizá podamos hacer algo al respecto..."

Una semana después, el circo estaba atestado de romanos ávidos de presenciar el gran combate entre Barnamus y el león. Nobelina y Fastidius fueron invitados al palco imperial. "Me parece que esta vez voy a pasar un buen rato", comentó el emperador Escándalus.

"Barnamus Bailus proporcionará sin duda la parte del león de nuestra diversión", respondió Fastidius con sonrisa falsa. El león quedó suelto. Barnamus salió disparado en dirección perpendicular a la recta definida por el león y él. El león, abandonando su fallida estrategia radial, atajó hacia Barnamus, encaminándose más o menos hacia donde éste parecía dirigirse. El hombre, sin prestar atención a la fiera, cambió súbitamente de dirección, tomando otra vez la perpendicular a la recta que le unía con el felino.

"No podrá seguir así por mucho tiempo", dijo Escándalus. "Barnamus tendrá que detenerse y luchar en cuanto se convenza de que no podrá evitar que el león le alcance."

Nobelina asintió con el gesto, fingiendo estar de acuerdo, pero sus pensamientos eran muy contrarios. Había enseñado a Barnamus una nueva estrategia para mantener al león a distancia. Comprobó que aquél la estaba ejecutando a la perfección. Supuso primero que el león se mantendría siempre en el mismo radio que él, y al hacerlo pudo aplicar el método de Egocentrix para trazar mentalmente una esquiral. Pero como el león ya no se atenía a la estrategia de persecución radial, era preciso que modificase sus movimientos en función de la posición concreta de la fiera.

Comenzó moviéndose perpendicularmente a la recta que pasaba por él y por el león. Corrió en esa dirección hasta que su trayectoria intersecó al radio paralelo a la recta. Llegado a ese punto, continuó en la misma dirección durante una distancia igual al primer segmento de la esquiral. Al terminarlo, evaluó la posición del león y volvió a tomar la perpendicular a la recta que le unía con la fiera. Corrió hasta cortar al radio paralelo y rebasarlo en una distancia igual al segundo segmento de la esquiral. Siguió calculando todos los movimientos posteriores ateniéndose a la misma regla.

Nobelina, antes de la lid, había demostrado que la estrategia iba a funcionar. El león no podría alcanzar a Barnamus a lo largo de ninguno de los segmentos de su trayectoria. Además, la trayectoria se mantenía siempre dentro del perímetro de la arena y su longitud total superaba cualquier cota finita.

Terminados los juegos Barnamus se acercó a Nobelina y le estrechó la mano con emoción. "Tu estrategia ha ido como una seda."

Fastidius hizo acto de presencia. "¡Hombre! Aquí tenemos a la estrella de los juegos. Tu actuación ha impresionado tanto al emperador que éste ha decidido que la repitas la próxima semana..."

"La verdad es que preferiría retirarme ahora que estoy en la cima de mi carrera..."

"—pero esta vez contra dos leones." Fastidius giró sobre sus talones. Barnamus miró implorante a Nobelina.

"Mucho me temo que contra dos leones la cosa no tenga arreglo", dijo Nobelina. "A menos que el emperador reconstruya el coso, haciéndolo tridimensional, y tornándolo de círculo en esfera. Puede demostrarse que n leones que corran todos a la misma velocidad que el gladiador pueden siempre atraparlo en una bola n-dimensional, mientras que n-1 no son suficientes si el guerrero adopta la táctica debida. Tal vez logre convencer al emperador de que coloque en el coso algunos obstáculos para que puedas esconderte tras ellos."

"¿De qué serviría eso?", preguntó Barnamus.

"Es cosa incierta. Un solo león no puede alcanzarte si hay un obstáculo: basta con que maniobres hasta interponerlo entre la fiera y tú y mantener así la situación. Pero la cuestión de si el guerrero conseguirá eludir siempre a dos leones cuando hay varios obstáculos está todavía pendiente de solución. Has de esforzarte al máximo en resolverla, Barnamus. Si Hera lo quiere, quizá puedas sobrevivir todavía."

"¡Pero si yo no sé una palabra de geometría!", gimió Barnamus.

"Debiste caer en la cuenta de que algún día pudiera serte útil", opuso Nobelina.

"¿Por qué habría yo de haber llegado a una conclusión tan absurda?"

"Porque, Barnamus, la geometría revela todo cuanto ahora quisieras saber para mantenerte a salvo de manadas de leones."

Libros

J. E. Beckman, Javier de Lorenzo, Emiliano Aguirre y Luis Alonso

Astronomía

Estado de la cuestión

NEW WINDOWS TO THE UNIVERSE. Dirigido por F. Sánchez y M. Vázquez. Cambridge University Press. Cambridge, 1990.

Los dos volúmenes de que consta este libro contienen las conferencias especializadas (más tres charlas generales) presentadas en el "XI European Regional Meeting of the International Astronomical Union", congreso celebrado en Tenerife en 1989. Estas reuniones son, en Europa, las equivalentes más próximas a las de la "American Astronomical Society" (AAS) en su vocación de reunir a los astrónomos profesionales de todo un continente y, a la vez, de todas las especialidades. El hecho de convocar una de ellas en Canarias significó el reconocimiento de la creciente madurez y capacidad de organización de la comunidad astronómica española.

Los artículo que componen la obra abarcan la gama casi completa de la astrofísica actual: el Sol y las estrellas de tipo solar, estructura y evolución de las galaxias, galaxias activas y cosmología, el medio interestelar e intergaláctico, instrumentación para la astronomía. Como cabe esperar en una aglomeración tan variopinta, hay notables diferencias en la calidad de los artículos.

Algunos merecen leerse a modo de introducción, breve y lúcida, en un campo de la astrofísica. Yo citaría, a este propósito: "Chromospheric phenomena in late-type stars", de P. Ulmschneider; "Radiative transfer problems in the solar and sun-like atmospheres", de J. Trujillo-Bueno; "Evolution of solar and stellar rotations", de S. Catalano; "Quiescent X-ray emission of cool stars", de C. Schryver; "Turbulent shear flow and rotation", de J. P. Zahn; "Surface abundances of light elements in stars", de R. Rebolo; "Structure of the galaxy", de G. Gilmore; "Chemical processes in interstellar clouds", de Y. P. Viala; "The local interstellar medium", de R. Génova, y "CCD's for the 1990's", de P. Jorden.

Esta selección no posterga el valor de los 60 artículos restantes. La verdad es que, por su contenido, la mayoría habrá de interesar a los especialistas de cada campo bajo revisión. Sin embargo, la restricción en la extensión impuesta a cada artículo por la necesidad de no exceder un predeterminado límite global de dos tomos, provoca que algunas colaboraciones resulten demasiado especializadas o demasiado ligeras. Defecto que se compensa, en parte, por la posibilidad de leer un conjunto de presentaciones que se complementan; quizá eso se vea mejor en la sección sobre galaxias activas. Pero esta posibilidad suele existir, a niveles más profundos y completos, en los volúmenes monográficos que resultan de congresos más especializados, lo que nos lleva a preguntarnos si valen la pena las obras de carácter general.

No está de más traer a colación la moda de editar las actas de otros congresos generales de astronomía. Los "proceedings" científicos de las Asambleas Generales trienales de la Unión Internacional Astronómica, que contienen resúmenes de todas las sesiones de las 51 comisiones, son inservibles, y no justifican el esfuerzo y el coste. Una reunión general de la AAS típica genera un libro delgado de "abstracts" de cada charla, clasificada por temas. Estos libros forman un fondo práctico de referencias para los nuevos trabajos, que permiten a sus lectores escribir a un investigador pidiéndole avances de sus artículos.

En términos de utilidad, *New Windows to the Universe* se encuentra a caballo entre los dos casos. Su contenido posee elementos de interés, pero el formato restringe lo que cada autor puede dar de sí, y a la vez excluye las contribuciones individuales, más cortas y especializadas que representan la investigación actual de los participantes (que se han publicado por separado, sin referencia alguna en este libro). Como contribución a un debate sugiero que sería más útil publicar un libro mucho más corto de resúmenes para este tipo de reuniones, al estilo de la AAS.

Y una cuestión delicada: ¿son realmente necesarias las reuniones de este tipo? El fin de cualquier congreso, sobre todo si no es cerrado, debe presentar una vertiente social, en el mejor sentido de la palabra, y facilitar contactos entre colegas de un campo. Se anudan ahí colaboraciones, brotan nuevas ideas y se sugieren proyectos de largo alcance. Esta es la cara positiva. Pero la necesidad de acompañar estos contactos por una forma más de regurgitar los mismos trabajos que se publican en otros sitios es un resultado del sistema que tiende a juzgar al científico meramente por la cantidad de sus trabajos, y de unas instituciones que no pagan el desplazamiento de un participante a un congreso a no ser que se publique un artículo firmado por el invitado.

Dentro de este marco poco halagador *New Windows to the Universe* destaca por encima de sus pares en cuanto a calidad. La editorial se ha esmerado en la presentación. Hay, además, dos puntos "higiénicos": la lista de los invitados que no llegaron a enviar sus manuscritos. Sé lo frustante que puede ser el retraso de una publicación por culpa de unos pocos recalcitrantes; listas de este tipo sirven para aviso de futuros navegantes. El segundo rasgo es el reconocimiento de que cada firmante es el único responsable de su propio artículo. Como editor de libros de congresos sé que el sistema "camera ready" impide casi cualquier posibilidad de mejorar un artículo, rindiendo la tarea del editor meramente testimonial. Consecuencia de esto es la calidad tan variable de los formatos de los artículos y los altibajos —inevitables— en el nivel del inglés; también, aquí, la inclusión de un artículo francamente excéntrico: "Birth of the myth of the birth of the Universe", de H. Reeves, que quizá no hubiese sido publicado en otras circunstancias.

New Windows to the Universe representa, pues, una "foto fija" del estado de la astronomía en Europa en las postrimerías de los ochenta, completado por tres ensayos sobre los planes técnicos de observatorios europeos del futuro, en tierra y en satélite. Si una institución quiere tener en su biblioteca un resumen de esta índole, hallará en este libro una obra clara, bien presentada y a un precio de adquisición muy asequible. (J. E. B.)

Mecánica cuántica

Su formalismo matemático

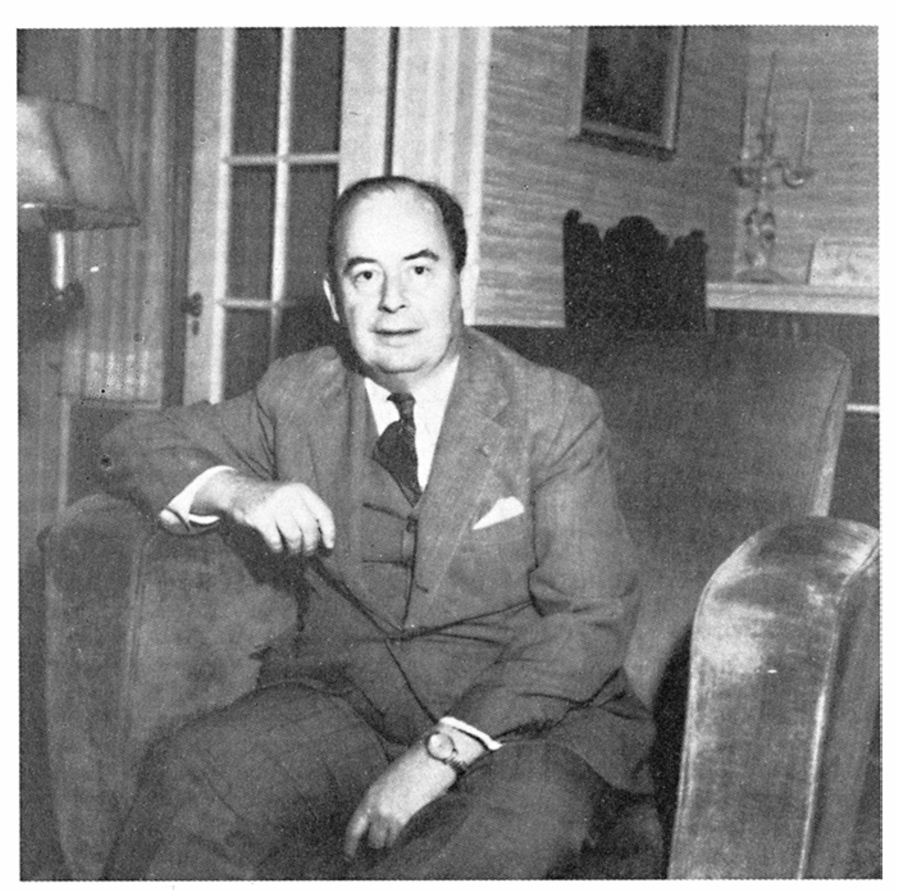
FUNDAMENTOS MATEMATICOS DE LA MECANICA CUANTICA. John von Neumann. Introducción de J. M. Sánchez Ron. Reproducción de la traducción de Ortiz Fornaguera. Consejo Superior de Investigaciones Científicas; Madrid, 1991.

El CSIC viene reproduciendo en facsímil algunas ediciones que fueron publicadas hace ya años y que se encontraban agotadas. Así, Fundamentos de la Geometría, un texto de Hilbert que, desgraciadamente, no se ve modificado en los errores, se supone que de impresión, que tuvo en su primera edición. No parece este el caso en la obra de von Neumann, ahora reeditada, salvo en el mantenimiento de términos como el de 'colectividad' por 'conjunto'.

El libro de von Neumann es un clásico de la mecánica cuántica. Como tal, leído hoy día por una minoría. Como tal, una obra clave. En él, von Neumann logró cristalizar tres elementos básicos para la concepción de la mecánica cuántica, y ello de manera absoluta: axiomatizar esta teoría; formular los espacios de Hilbert para operadores lineales continuos en un espacio infinito-dimensional; establecer la interpretación estadística mediante la densidad de probabilidad de presencia de un sistema de puntos *qi* del espacio de estados. Como instrumento matemático operacional, quizá sea el segundo el más positivo al dar el formalismo matemático para la mecánica cuántica; como elemento conceptual, el primero. Como clave para la interpretación estadística de la mecánica cuántica, frente a las interpretaciones deterministas, el tercero.

En este último von Neumann obtuvo lo que, en su opinión, constituía uno de sus resultados más notables: el postulado de proyección, que indica las probabilidades de que, en un mismo estado, varias magnitudes tomen simultáneamente ciertos valores dados de antemano. Ello implica que sólo se tiene información estadística de las magnitudes por separado y no puede obtenerse el dato de una correlación, la función de correlación, entre las mismas. Aquí se incardina la afirmación de que es inevitable que la mecánica cuántica deje de ser una teoría causal.

Al no ser causal ni determinista, la mecánica cuántica no puede manejar 'variables ocultas', es decir, no puede admitir el manejo de parámetros adicionales a la teoría, aún no



Johann von Neumann (1903-1957).

explicitados en la misma, pero que determinen un suceso individual. Una explicación con parámetros representando variables ocultas se le muestra a von Neumann como "incompatible con ciertos postulados fundamentales de la mecánica cuántica". Afirmaciones que se apoyan en lo que hoy se califica como 'teorema de von Neumann': no pueden existir conjuntos libres de dispersión (p. 230). Es un teorema que se obtiene, precisamente, de su base axiomática y de una serie de definiciones. En un remedo de hacerlo comprensible, lo que quiere indicar es que los estados cuánticos no pueden considerarse como promedios de estados, sin dispersión, que se puedan medir con precisión. Lo cual implica que la mecánica cuántica no podrá ser completada nunca.

Muy en esquema los axiomas de von Neumann, de los que se derivan teoremas como el antes mencionado, establecen: existe una correspondencia biyectiva entre observables y operadores hermíticos; si a un observable le corresponde una matriz, al observable transformado mediante una función le corresponde la matriz transformada por la misma función; los valores medios son lineales. Este último axioma, la admisión de linealidad, es un elemento a discutir y, de hecho, el propio von Neumann, hacia 1946, indicaría las limitaciones de la linealidad como instrumento matemático para describir o explicar ciertos fenómenos naturales, especialmente los de turbulencia, termodinámica y, en particular, algunos relacionados con la computabilidad. Terreno este último en el que fue uno de los grandes innovadores hasta el punto de que, en la actualidad, su figura viene destacándose en este campo en detrimento de sus contribuciones, muy originales, en otros terrenos de la matemática.

La aparición de críticas al modelo establecido por von Neumann no se produce, realmente, hasta veinte años después de la publicación de esta obra. Algo en consonancia con la admiración y respeto que produce una obra matemática y axiomatizada, además, en la línea de los fundamentos exigida por Hilbert. Respeto que vino a resumir Max Born, en 1948, al indicar que esta obra establecía el formalismo de la mecánica cuántica de una manera total y unívocamente determinado, por lo que establecía, a la vez, el carácter indeterminista de la teoría y, si en el futuro se quería volver a una teoría cuántica determinista, la formulación de von Neumann era tal que no admitía retoques, por lo que obligaría a un cambio sustancial de todo el formalismo establecido. De modo efectivo,

sólo hacia 1952 surgen algunas críticas ligadas, básicamente, al tercero de los axiomas señalados. Con leve modificación se pueden establecer modelos en los cuales las medidas son precisamente causales, algo que prohíbe el teorema de Neumann. En 1966 Bell demuestra el teorema que hoy lleva su nombre y que posibilita pasar al campo experimental para establecer si la mecánica cuántica, por no completa, es incorrecta y hay que admitir modelos con variables ocultas.

El libro de von Neumann no se agota en temas como los anteriores. Capítulos clave siguen siendo los dos dedicados a la medición donde al establecer el problema de la reducción del paquete de ondas se resalta la importancia de que el observador esté dotado de conciencia, por lo que el acto de percepción subjetivo es el que genera la reducción del paquete de ondas. Algo que viene dado porque, para von Neumann, hay que dividir el universo en dos partes: el sistema observado, el observador (p. 299).

El libro, además del texto en facsímil en la primera edición, cuenta con una amplia Introducción de Sánchez Ron situando al autor y su obra. La inicia con unos apuntes biográficos, expone la tensión entre una obra de matemática 'pura' y una 'aplicada', las contribuciones a otros campos, la colaboración con los planes militares americanos... y un resumen de la obra a la que sirve de Introducción. Hay que destacar el reconocimiento explícito de Sánchez Ron para Ortiz Fornaguera, traductor de la obra a instancias de Terradas. Traducción 'competente', con numerosas notas, destinada a ser obra de trabajo para los cursos que dirigía Terradas en el Seminario de Física Matemática. Sánchez Ron agrega un Apéndice con la intervención de von Neumann en Varsovia, 1938, donde resume su concepción estadística de la mecánica cuántica. (J. L.)

Paleontología humana

¿Madre o abuelos?

AUX ORIGINES D'*HOMO SAPIENS*. Jean-Jacques Hublin y Anne-Marie Tillier (eds.). Presses Universitaires de France, Paris, 1991.

El más controvertido de los interrogantes sobre la naturaleza y dinámica del género humano, a la llegada de los años noventa, es el del origen de la humanidad moderna —o de las formas humanas modernas. Acierto, pues, de P.U.F., al elegir este asunto para un tomo de su Nouvelle Encyclopédie Diderot con múltiple autor y estructura de debate. Los organizadores del volumen lo centran en los datos de paleontología humana y sendos capítulos sobre los argumentos arqueológicos y genéticos. Se completa la simetría con el prólogo de F. C. Howell, que sirve de presentación clara y sobria.

La disputa saltó en 1984, cuando varios datos y teorías parecieron coincidir en señalar un origen brusco, total, singular y relativamente reciente de la humanidad actual: todas las razas vivientes en el mundo tendrían un único origen en una población africana de hace no más de 200.000 años. Las teorías en que se apoya este modelo son: un cálculo demográfico del número de generaciones maternas que nos remontarían a una madre común de todos los seres humanos vivientes y otro cálculo que supone conocer la velocidad regular con que se producen ciertas mutaciones en los anillos de ADN mitocondrial que se transmitirían sólo por vía materna, y cuyos nudos de divergencia más remotos, en árboles de distancias, siempre llevan a tipos africanos. El apoyo paleontológico de esta teoría, llamada de "Eva", estriba en el hallazgo de fósiles humanos en Sudáfrica y Africa oriental con rasgos modernos, a los que se atribuyó antigüedad superior a 120.000 o 130.000 años y se consideró como los "modernos" más antiguos, y la rápida y neta sustitución de los neandertales en Europa occidental por los modernos de tipo Cro-Magnon: se infirió que esta sustitución era absoluta, sin ningún mestizaje, y se extrapoló el caso a todas las poblaciones fósiles del mundo. Este modelo cumplía las predicciones del "reloj molecular" aplicado al ADN mitocondrial, por el que las razas humanas actuales nada tendrían que ver con la diversidad de la humanidad fósil en el Pleistoceno medio.

Los modelos opuestos a la teoría de "Eva" reconocen el origen africano de toda la humanidad, conforme al árbol genalógico del ADN mitocondrial y a la evidencia fósil, pero rechazan el cálculo del "reloj" de Sarich y Wilson, mantienen la presencia de rasgos modernos en fósiles de varias regiones coetáneos de los africanos, la continuidad de rasgos arcaicos regionales en modernos, incluso mestizaje de neandertales con modernos en el Norte de Africa, Europa central y Próximo Oriente por lo menos. En consecuencia, la humanidad actual provendría de la que se extendió hace más de millón y medio de años desde Africa a Eurasia, con evolución isomérica, moldeada con fenómenos de flujo génico y presiones selectivas en diversas partes del mundo.

Además de descripciones y evaluaciones de los rasgos morfológicos, no sin excepciones —se dice poco de Amud, Shanidar, Yebel Irhoud, con lo que pueden aclarar—, los autores de capítulos sobre grupos regionales ofrecen resúmenes históricos, imágenes, mapas, cortes geológicos e información arqueológica y revisión cronológica. El progreso en las técnicas geocronométricas está implícito pero firme.

Casi sólo queda Bräuer como mantenedor de la teoría de "Eva", que él supone generalmente aceptada, aunque en otro pasaje restringe discretamente a la parte occidental del Viejo Mundo. Sólo para esta parte del mundo, esto es, para el relevo de los neandertales de Francia, la admitirían Hublin y Tillier. Stringer ya no la defiende como hace media docena de años. Bar Yosef y Vandermeersch pasan de ella, pero aportan datos contrarios. Los demás, Smith y Trinkaus, Wu, Wolpoff, la contradicen. Smith y Trinkaus defienden largamente la continuidad entre neandertales y modernos en Europa central y muestran rasgos de herencia neandertal en modernos como el cráneo de Mladec; Wu lo hace para la secuencia de fósiles pleistocenos de China. Ninguno habla de rasgos de neandertal en africanos, y los hay: le tocaba a Bräuer que tiene confiado el estudio de los fósiles de este continente. En realidad, y éste es el nuevo matiz que el libro pone en la controversia de la "Eva" moderna, vemos acercarse un tanto las posturas con cierta prudencia ante la extrapolación del caso de los neandertales occidentales.

El hecho, de que Bräuer reconozca un cierto holismo en la formación del hombre moderno, apenas diacrónica, en todo el continente africano deja vacío de fuerza su argumento contra la realización de esa tendencia común heredada en regiones limítrofes, o más alejadas, de Eurasia. Por otra parte, está claro que ninguno de los contertulios se opone a reconocer un Edén, o un origen africano remoto para toda la humanidad, inclusive la humanidad fósil representada al menos por los llamados "Homo erectus" más antiguos de Africa y los primeros que vivieron fuera de ella. Sólo se rechazan la idea de una nueva génesis que implique el exterminio de todos los humanos que vivie-

ron hasta hace 120.000 años, y un origen puntual (Wolpoff) de los modernos: Smith y Trinkaus traen a este propósito el principio de parsimonia, que Bräuer aduce contra el progreso hacia las formas modernas en Africa y en Palestina. Sobre el conocimiento actual y las cautelas recomendables en la lectura de los indicadores moleculares previene en esta obra Pierre Darlu, autor del último capítulo, para quien actualmente las velocidades de evolución del material genético no nos son conocidas con precisión.

Un problema no confesado, grave y abierto a últimos de este milenio, es el problema racial. Cohen está segura de que los datos actuales anulan las clasificaciones raciales anteriores, pero el registro fósil parece sugerir lo contrario, como resume Wolpoff en su conclusión. La esencia de la cuestión es cómo vino la humanidad a ser como es, en diversidad biológica y unidad específica. Hacia este planteamiento se orientan las consideraciones sobre método y criterios que ofrecen alguna novedad en esta obra. Mientras Rightmire parece seguir dando valor independiente a rasgos singulares —grosor de pared ósea, excrecencias óseas como rebordes o tori y quillas craneales—, otros se detienen ante rasgos que pueden estar interrelacionados, o depender conjuntamente de factores funcionales y del crecimiento, como Stringer y el tandem Hublin-Tillier. Estos últimos aparecen aún algo confundidos por la prioridad que siguen dando al criterio de polaridad, rasgo a rasgo y entre agrupaciones taxonómicas prejuzgadas, aunque también recomiendan considerar los aspectos adaptativos funcionales, inclusive biomecánicos, y atender más al análisis poblacional que al tipológico.

Wolpoff también prefiere no discutir sobre rasgos individualizados, sino sobre sus combinaciones, y en términos de frecuencias. Stringer distingue además entre el rasgo y su "modo de expresión" y aborda dos serias cuestiones metodológicas aquí inexcusables: la noción de especie en paleontología, y la legitimidad del criterio cladístico en el interior de una misma especie, admitida o supuesta su unidad como tal. La equivocidad en clasificación y nomenclatura ha obscurecido mucho el camino en esta materia, y no la vemos del todo disipada. La definición y distinción entre *Homo erectus* y *Homo sapiens* queda aún como asignatura pendiente. Sólo podrá aprobarse si estas categorías taxonómicas se redefinen en términos de dinámica biológica entre diversidad y unidad.



¿De quién o quiénes proceden las cinco razas de Blumenbach (1752-1840)?

Quizá sea éste el último libro sobre la materia que no explote la información de los fósiles de Atapuerca sobre variabilidad, frecuencias, combinaciones de rasgos, tamaño de población y adaptación tecnoecológica de uno de los llamados transicionales. Después de éstos, hace ya menos de 150.000 años, vemos acelerarse el ritmo del cambio y la eficacia de selección en todos los niveles. Aquí acierta Rightmire en deshacer la disyuntiva de evolución gradual o puntuada en el concepto, hoy tangible con la calibración cronológica, de aceleración de ritmo. Hublin y Tillier constatan que en una misma población la morfología de neandertal se halla en grados variables con lo que vienen a afirmar el polimorfismo dentro del politipismo regional. Wu sostiene una dinámica semejante de los rasgos, o sus expresiones y frecuencias dentro de una amplia población regional y un lapso de tiempo.

La heterogeneidad regional (politipismo) es explicada por Smith y Trinkaus como producto de flujos génicos, activados temporalmente por mestizajes debidos a su vez a fenómenos de inmigración, y de "cambios morfológicos orientados" o efectos de selección en que inciden la adaptación o el comportamiento. Parece, pues, retornarse al concepto darwiniano de variación —hoy se habla más bien de diversificación—

seguido, a modo de pulsación, de la contracción por los efectos de selección y encauzamiento génico. Esta secuencia se activaría en ciertas épocas, y el resultado sería de nuevo una especie politípica y polimórfica —Wolpoff aquí, como ya defendiera Juan Comas hace 25 años—, con unidad reforzada por el predominio de determinadas combinaciones de tendencias comunes y aporte mayor de unas y otras poblaciones de la época crítica en lo diferencial.

El resultado de divergencia específica o cladogénesis no se habría producido en el caso humano. En esto parecen estar de acuerdo Hublin y Tillier, sin acabar de verlo claro, con Smith y Trinkaus. Wolpoff sostiene este modelo con argumentación copiosa y aguda, incorporando una teoría genética de centro y poblaciones periféricas (p.134), que se parece singularmente a la clásica de Vavilov, hace casi 70 años; no lo cita. El criterio arqueológico no es extraño al asunto, a juicio de los organizadores de la obra y de otros entre los contertulios. Se le dedica un capítulo y un especialista, P.-Y. Demars.

En fin, este libro deja ver que crece el rigor en el análisis paleantropológico y la cautela en la aplicación de coeficientes presumidos constantes a los datos genéticos. Invita a progresar en la relación entre la escasez mutacional y la riqueza fenotípica de la humanidad, y en el estudio paleodemográfico y del influjo ecotecnológico en la dinámica biológica de la especie humana en la penúltima etapa de su evolución.

Hace unos años, revistas y textos científicos impusieron la teoría del ramapiteco eurasiático como antecesor humano: lejos estarían los africanos gorila y chimpancé; la rama humana se remontaría a hace más de 15 millones de años. No todos los paleontólogos la subscribían. Los primeros estudios moleculares genéticos comparados de Primates llevaron a afirmar no sólo el parentesco más próximo entre los homínidos y los hominoideos africanos, que otros paleontólogos manteníamos, sino que se pretendió datar el antecesor común de humanos, chimpancés y gorilas en 2,5 o 3 millones de años, fecha inaceptable para los paleontólogos. Se revisaron los métodos y relojes y se estudiaron nuevos datos. Hoy están de acuerdo genéticos y paleontólogos en que el parentesco humano con los hominoideos africanos es más próximo que con los eurasiáticos, y que los linajes de aquéllos se separaron hace no menos de 5 o 6 millones de años. Ojalá pase pronto lo mismo con el reloj mutacional, y sepamos si Eva se quita años, o si tenemos más abuelos retratados en los fósiles. (E. A.)

Matemática ancilar

Nemorarius y Regiomontanus

Jordanus de Nemore, De elementis arithmetice artis. Edición preparada por H. L. L. Busard. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1991. **Regiomontanus: his life and work**, por Ernst Zinner. North-Holland; Amsterdam, 1990. **Mathematik im Studienplan der Jesuiten**, por Albert Krayer. Franz Steiner Verlag; Stuttgart, 1991.

Si el lector es amigo de la matemática, y debe serlo para darle sentido a su vida según afirmaban los astrónomos precopernicanos, conocerá tres obras clásicas de introducción a su historia: *A History of Mathematics* de Carl B. Boyer, *Mathematical Thought from Ancient to Modern Times* de Morris Kline y *Histoire des mathématiques* de Jean-Paul Collette. Más la hispano-argentina *Historia de la Matemática* de Julio Rey Pastor y José Babini (este último era partidario acérrimo del uso en singular de dicha ciencia, lo que explica el título). Los cuatro resaltan la importancia de Jordanus Nemorarius y de Johannes Regiomontanus en el desarrollo de la matemática subyacente a la física, el primero, y auxiliar de la astronomía, el segundo. Apenas se apartan en la descripción del contenido de la obra de ambos clásicos, lo que mueve a pensar en unas mismas fuentes de información, Clagett y Sarton, con ligeros matices (Boyer y Kline manejan, además, *Regiomontanus on Triangles* de Barnabas Hughes).

Clagett sigue vigente como marco general. Pero de Sarton acá ha llovido mucho. Se ha celebrado, por ejemplo, el 500 aniversario de la muerte de Regiomontano, con reuniones internacionales en torno a su figura y su obra en Bamberg, Viena, y Nuremberg, y el 550 aniversario de su nacimiento con sendos congresos en Ezstergom y Königsberg. En ambas efémerides se pasó revista a la matemática y la astronomía del siglo XV y... al libro *Leben und Wirken des Joh. Müller von Königsberg, genant Regiomontanus* de Ernst Zinner, cuya traducción inglesa con suplementos que recogen las últimas investigaciones en torno al renacentista es el segundo título a reseñar. Pero vayamos por orden.

Jordanus de Nemore, De Elementis Arithmetice Artis es la edición crítica del tratado medieval sobre teoría de números que ejerció influencia más duradera. No es la primera vez que la labor historiográfica de Busard aparece en estas páginas. A él se le debe la reconstrucción de la visión geométrica medieval a través del rastreo de los *Elementos* de Euclides. Ahora vuelve sobre el álgebra con Jordanus de Nemore.

Cuando se aborda un estudio de ese período tan fragmentariamente conocido, conviene empezar por identificar al personaje. ¿Entre qué fechas vivió? Hubo de hacerlo antes de 1260, año en que Campanus acababa de componer su versión de los *Elementos* de Euclides, donde aparece citada la *Arithmetica* del Nemorarius; y hubo de hacerlo también después de la primera traducción al latín de la obra euclídea y de otras mencionadas en los escritos de Jordanus, lo que aconteció a lo largo del siglo XII. De donde se infiere que nuestro autor viviría en la primera mitad del XIII.

¿Quién era? Busard recoge, y criba, las razones aducidas por quienes lo asociaron a Jordán de Sajonia, brillante científico del renacimiento medieval que se convertiría en el segundo maestro general de los dominicos, a la muerte de su fundador el español Domingo de Guzmán. Para otros, se trataría de un personaje distinto (y se basan, por ejemplo, en que en los escritos de Jordán de Sajonia no aparece nunca "de Nemore"). Tras sopesar las diversas razones, Busard concluye: "es posible que los dos no sean más que el mismo; pero no es probable ni improbable que fuera así. Quizá sea ya demasiado tarde para encontrar pruebas en un sentido o en otro."

Perfilado, hasta donde se ha podido, el hombre, se pasa revista a su obra. Nos han llegado seis trabajos autentificados: *Liber philotegni, Elementa super demonstrationem ponderum, Algorismus, Liber de numeris datis, Demonstratio de plana spera y De elementis arismetice artis*, esta última "fuente oficial de la aritmética teórica de la Edad Media". Pero no sólo de ese período. Regiomontano y algún renacentista más se propusieron publicarla y afianzar así su uso de texto universitario a principios del siglo XVI.

¿De qué trata la *Arithmetica* de Nemorarius? Jordanus se propone crear, a imagen de Euclides, los *Elementos* de la aritmética. Con el es-

pejo de la geometría del alejandrino, organiza su obra, que se desarrolla en definiciones, axiomas y postulados y se estructura en proposiciones. En las pruebas de las proposiciones emplea letras del alfabeto para representar números, sugiriendo, destacan algunos, el concepto de parámetro.

De Elementis Arithmetice Artis consta de diez libros, de los que el editor va resumiendo y anotando las posibles fuentes de otros matemáticos (Boecio, Adelardo, Ahmad ibn Yusuf). Se ocupa, en efecto, de las propiedades de las relaciones de igualdad y desigualdad (mayor que, menor que), números primos y compuestos, máximo común divisor y mínimo común múltiplo, multiplicación y división de razones (verbigracia: $a/b{:}c/d = a/c{:}b/d = d/c{:}b/a$), cuadrado de la diferencia de dos números, números pares e impares (múltiplos y divisores de los mismos), números figurativos, etcétera. Busard facilita la comprensión del texto con la traducción en álgebra moderna de la exposición inaprensible para la mayoría del texto original (por ejemplo, la primera proposición del libro X, que dice, "si hubiera tres números dispuestos con naturaleza media aritmética, la razón del mayor al medio será menor que la del medio al mínimo", es, para nosotros, "Dado $a-b = b-c$, entonces $a/b < b/c$).

Johannes Müller (1436-1476), más conocido por el patronímico *Regiomontanus* (de su Königsberg natal), culmina la astronomía medieval con su reforma interna del sistema ptolemaico y pone las bases de los nuevos modelos de Copérnico, Tycho Brahe y Kepler. La biografía que Zinner escribió en 1968, que en versión inglesa abre la colección de "Studies in the History and Philosophy of Mathematics", de North-Holland, se convirtió pronto en fuente inexhaurible de información sobre dicho autor y cuantos le rodearon, sobre las tablas astronómicas y almanaques de ese tiempo, así como sobre el desarrollo de la trigonometría involucrada en la medida de la eclíptica, paralajes, distancias planetarias y eclipses.

La biografía, en breve, es del hombre y su tiempo. Un trabajo titánico, cuyas deficiencias, escasas y menores en su mayoría, se subsanan en las páginas complementarias de varios autores. El grueso del volumen corresponde así a las distintas etapas de Regiomontano, al hilo de las cuales asistimos la evolución de su pensamiento y de su creación matemática.



Aurea Scientia Mathesos, *pintura que aparece en un manuscrito de las clases dadas por Otto Catenius en la Universidad de Mainz durante el curso académico de 1610-1611.*

Hijo de un rico molinero de Königsberg, que entra niño en la Universidad de Leipzig, cuando se imprime allí el primer calendario con mínimas innovaciones, como la adaptación de las tablas alfonsinas a la latitud del lugar. Viena, sin embargo, se muestra exigente para el matriculado en 1451. La obtención del primer grado académico, el de bachiller, requiere del candidato un conocimiento cabal del *De Sphaera* de Johannes de Sacrobosco, nociones de álgebra y dominio del libro primero de los *Elementos* de Euclides. Para subir el siguiente eslabón académico, debía saberse ya la teoría planetaria de Gherardo da Sabbionetta, los principios de óptica geométrica, los cinco primeros libros de los *Elementos* y un tratado clásico elegido por el propio examinando. Los cursos académicos se sucedían, además, dentro de una norma estricta de dificultad matemática creciente. Había buenos maestros, George Peuerbach sobre todos, en un ambiente de protección real (Federico III) de las artes y las ciencias. La enseñanza teórica se completaba con el adiestramiento en la construcción de relojes solares (Viena poseía el primero cuyo gnomon señalaba el polo), la confección de almanaques y la interpretación de los cometas.

La amistad con Peuerbach introdujo a Regiomontano en el círculo del cardenal Bessarion, legado papal en

la capital austriaca, quien había encargado a su maestro un epítome del Almagesto, es decir, una traducción latina compendiada e inteligible, que sustituyera a la literal realizada siglos antes por Gerardo de Cremona. Peuerbach murió, en 1461, antes de completar la obra y cedió el encargo a su discípulo. Habían pasado juntos largas noches de observación de las trayectorias de los planetas; habían mejorado las tablas al uso (alfonsinas, de Bianchini, de Oxford y de Gmunden). Tareas que simultanearon con la dedicación a la aritmética y geometría. Regiomontano, por ejemplo, llegó hasta el quinto de los números perfectos (aquellos que son iguales a la suma de sus divisores positivos, excluido él mismo).

Como puede adivinarse, la labor depuradora de las mediciones partía del supuesto de una verdad sustancial de la tradición científica que les había precedido. De ahí el afán por hacerse con (o copiar) el número máximo de manuscritos u obras impresas de los autores clásicos. Besarion poseía una biblioteca espléndida, enriquecida en parte por Regiomontano, de matemáticas (Apolonio, Arquímedes, Barlaam, Cleomedes, Diofanto, Euclides, Nicómaco, Sereno y Teodosio), de tratados generales de astronomía (Aratos, Euclides, Hipsicles y Proclo), teorías planetarias (Cleomedes y Proclo), astrolabios (Juan Filopón y Nicéforas Gregoras), tablas (Theon, Crisocokes y persas), trayectorias solares y lunares (Isaac Argiros), obras de Ptolomeo y comentarios a las mismas, comentarios al *Timeo*, etcétera.

Acabado el *Epítome*, en Italia, Regiomontano acometió el *De triangulis* y los *Problemata Almagesti*. La obra sobre los triángulos, que se publicaría póstumamente, ganó reconocimiento con los años. Aborda en ella los triángulos planos, la ley del seno y la trigonometría esférica. Complementaria de sus trabajos sistemáticos es su correspondencia, en particular con Giovanni Bianchini, donde el nudo de la misma gira en torno a problemas cuya solución se espera del destinatario. Plantea Bianchini: "¿Cuál es la latitud, la longitud y el arco diurno de una estrella que se halla a una altitud de 39° 16' en el meridiano de Ferrara el 5 de abril de 1463, dos horas y veinticinco minutos después del ocaso? Ferrara se encuentra a 44° 45' 4" de latitud Norte y a 32° de longitud Este". Para ello le hacía llegar sus propias *Tabulae primi* mobilis. Pero Regiomontano prefirió resolver la cuestión con su propia trigonometría esférica y tabla de senos. Hacia este campo, en efecto, llevaba él la relación epistolar: "Encuentre, escribía a Bianchini, la latitud y declinación de una estrella, conocidas su longitud y culminación". (Gerl, en el suplemento, reivindica la figura de Bianchini, no excesivamente bien parada en los párrafos que le dedica Zimmer.)

Regiomontano pasa una temporada en Hungría confeccionando tablas, fabricando instrumentos de observación y aplicándolos a su seguimiento diario del curso de los planetas para refinar los datos orbitales. En Nuremberg, su penúltima estancia antes de encontrar la muerte en Roma, imprime las Ephemerides, almanaques o calendarios que recoge las posiciones del sol, los planetas, la luna, los nodos lunares (puntos donde el satélite corta la eclíptica), las fases de la luna y la situación relativa de esos cuerpos celestes, para los días de los años 1475-1506.

La influencia de Regiomontano en España se deja sentir muy pronto en el círculo salmantino de Zacuto y su discípulo Vizinho, autores de almanaques que utilizaría Colón. Y en los propios estatutos de la universidad charra (mediados del XVI), mandábase: "El segundo año (se enseñará) seis libros de Euclides y Aritmética hasta las raíces cuadrada y cúbica, y el Almagesto de Ptolomeo o su Epítome de Monte Regio, o Geber, o Copérnico, al voto de los oyentes, en la sustitución la Esfera."

Sin solución de continuidad podemos doblar el siglo y asistir al curso académico de 1610-1611 en la facultad de artes de la Universidad de Maguncia, donde el jesuita Otto Catenius da clases de matemática, recogidas en los apuntes de un alumno. Sobre ese manuscrito Albert Krayer ha elaborado su tesis doctoral, transformada en *Mathematik im Studienplan der Jesuiten*.

Krayer desarrolla el trabajo según un patrón exigente y obligado: introducción de la Compañía en Alemania, situación de la Universidad de Maguncia y la matemática en la obra pedagógica de los ignacianos. Insiste en este último punto, en particular, y lo enmarca en la *ratio studiorum* de la orden. Desde mediados del XVI abundan los textos que incitan a una profundización en el estudio y en la enseñanza universitaria de la matemática. Nadal aconseja (en 1552) un curso preparatorio de aritmética, al que sucederían otros en que se explicara Euclides, Sacrobosco, instrumentos de medición, música, óptica, geometría y astronomía. Pero sería Clavius quien, en los primeros años del decenio de los ochenta, dictara normas para elevar la disciplina a un nivel del máximo rigor, que permitiera ahondar en el conocimiento de la física: "la física no puede entenderse debidamente sin el dominio de la matemática, en especial la física que aborda el número y movimiento de los orbes celestes". Expone cuál debe ser la gradación de la docencia en los dos años académicos que cubre: Euclides I-VI, aritmética, esférica, confección de almanaques, cuadrantes, óptica, Euclides XI-XII, trigonometría, geografía, astrolabios, teorías planetarias, álgebra, cuadraturas y trayectorias.

Esa función ancilar de la matemática encuentra en las preocupaciones científicas del momento una de sus principales explicaciones. Cierto es que, desde el espléndido desarrollo de la astronomía árabe en la Edad Media, la matemática había sido su hermana inseparable. Pero la efervescencia de modelos planetarios en el XVI y XVII, que pone en cuestión la física celeste aristotélica, exige un replanteamiento radical del papel de la filosofía natural entera y de sus herramientas propedéuticas: la lógica y la matemática. Por ceñirnos al caso menos familiar para el lector de hoy, el de la lógica, vuelve la vieja distinción entre la demostración *quia* (la que prueba la existencia real de algo) y demostración *propter quid* (la que saca a la luz la causa directa de la existencia real de algo); vuelve también la distinción entre *notiora nobis* (lo que es más familiar al hombre) y *notiora natura* (lo que por su propia naturaleza debiera serle mejor conocido); distinciones ambas, con otras, que tienden a arropar la preocupación por "salvar las apariencias", de larga tradición historiográfica en astronomía, a partir de Galileo sobre todo.

El manuscrito se abre con una justificación de las partes generales en que se divide la matemática (y que constituye el curso: aritmética, música, geometría y astronomía) y una definición de los diversos niveles mostrativos (proposición, problemas, teoremas y lemas) y principios (definición, postulado y axioma). Dentro de la parte astronómica, siente especial predilección por el sistema y clasificación de Brahe. Copérnico es considerado autoridad en mediciones y distancias, Kepler en óptica, Galileo (todavía desconocido) en observaciones planetarias y los "hispani" en geografía. (L. A.)

Apuntes

La biología de la reproducción parece inclinada a no reconocer la existencia de peces y anfibios enteramente unisexuales (partenogenéticos). Cierto es que hay poblaciones exclusivamente formadas por hembras, pero el óvulo de las mismas sólo se desarrollaría, se postula, por estimulación espermática del macho de una especie sexual simpátrica. En unos casos, el macho no aportaría cromosoma alguno al nuevo individuo, cuya dotación genética sería idéntica a la de la madre; en otros, el macho aportaría el genoma haploide, que se eliminaría antes de la meiosis. Lo segundo es lo que ha acontecido en la salamandra del género *Abystoma*: las hembras podrían haberse reproducido sin dotación paterna a lo largo de cinco millones de años.

La novedad constituye uno de los motores de la actividad científica. Desde el descubrimiento, el año pasado, de la galaxia IRAS 10214+4724, fuente distante de infrarrojos y uno de los objetos más resplandecientes del cielo con 10^{14} veces el brillo del Sol, los estudios sobre sus propiedades no han cesado. La postrera hipótesis ve en ella una galaxia molecular, es decir, formada por gas en vez de por las habituales estrellas componentes. Poseería una cantidad de monóxido de carbono equivalente a $2\text{-}6 \times 10^{11}$ masas solares, lo que vendría a significar la masa total de las estrellas que comprende una galaxia espiral de tamaño grande.

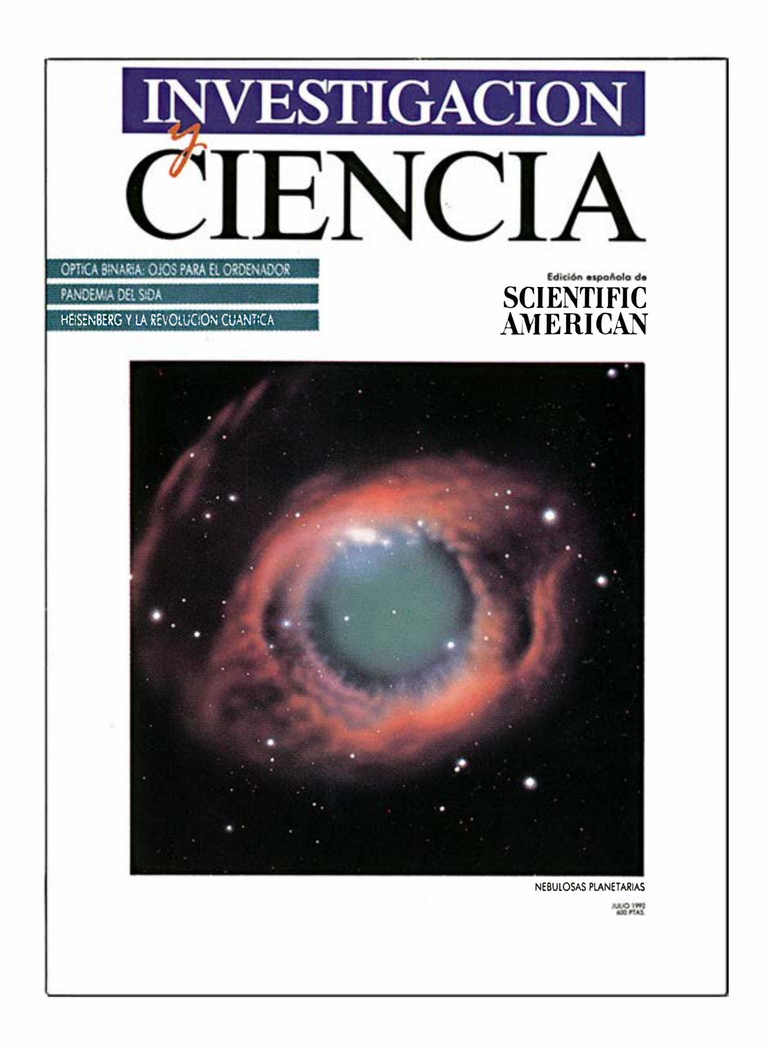
Los hay detallistas. De cierta monografía técnica sobre química del oxígeno escribe el reseñante en un número reciente de *Nature*: "Aunque la encuadernación del libro es muy buena y el precio de venta proporcionado de acuerdo con el mercado, la tipografía deja que desear a tenor de los cánones de la estética y muestra una irregularidad peculiar e intermitente en el espaciado entre líneas. Una editorial del prestigio de... podría a buen seguro haberlo hecho mejor. Y, por decirlo todo, como conviene a un libro que versa sobre el mejor amigo de todos los elementos que tienen que ver con el ambiente, es una buena noticia saber que se ha impreso en papel reciclado."

La alegría del espectacular descubrimiento del COBE no debe obnubilarnos y hacernos creer que la astrofísica avanza con paso seguro. Otros observatorios, así el Compton, traen tantas dudas cuantos datos aportan, que no son pocos, relativos a la fuente de pulsos de rayos gamma. Esas ráfagas se hallan isotrópicamente distribuidas por todo el firmamento. Y, dado que nuestra galaxia es un disco plano, se supone que proceden de allende sus confines, de otras galaxias. Pero, siendo menor el número de los destellos más débiles (los más lejanos), se sospecha un origen cercano, lo que no se corrobora cuando miramos hacia la Gran Nube de Magallanes o hacia Andrómeda, nuestras vecinas.

Se suele conceder escasa atención a la difusión química a la hora de abordar la evolución del magma del interior de la Tierra. O se solía, deberemos decir. En las cámaras magmáticas estratificadas, la difusión química avanza con suma lentitud desde los magmas máficos más pesados procedentes del manto y desde el magma rico en silicio procedente de una corteza que se funde. Ello no obsta para que la difusión isotópica se desarrolle con rapidez suficiente y porte información de la interacción dinámica entre capas. El estudio de isótopos de neodimio y estroncio de muestras extraídas de la intrusión máfica de Muskox nos revela que dicha intrusión tardó 100.000 años en cristalizar.

De los suelos se ha escrito que son las membranas de la Tierra, con un comportamiento de renovación tan activo como el de las que encierran la célula viva. Sus propiedades varían con la profundidad y tienen que ver con las tensiones de la textura, el grado de mezcla y el equilibrio entre la eliminación de masa en suspensión o solución y la acumulación de masa en la vecindad de la superficie. Los canales abiertos por las raíces muertas y los animales hipogeos facilitan el acarreo descendente de detritus orgánicos e inorgánicos. La acumulación se produce cuando la estrechez de los poros bloquea todo transporte. Los procesos de translocación y crecimiento de las raíces crean tensiones subterráneas amortiguadas por la disolución mineral de los ácidos orgánicos, fase inicial para la renovación del suelo.

Seguiremos explorando los campos del conocimiento



ANALISIS DE LA PANDEMIA DEL SIDA, por Roy M. Anderson y Robert M. May
Los modelos matemáticos nos enseñan a entender de qué modo se produce la infección vírica de los individuos y las comunidades. Llegan a resultados que contradicen muchas veces la intuición.

RESTOS QUE HABLAN, por Philip E. Ross
Los ácidos nucleicos y las proteínas que se encuentran en momias de la antigüedad clásica y en huesos de tiempos más remotos son arcones que guardan la historia de nuestros antepasados.

NEBULOSAS PLANETARIAS, por Noam Soker
Estas nubes fluorescentes de gas representan el último destello de estrellas moribundas y explican la evolución de los cuerpos celestes, e incluso el destino último del universo.

PUNTOS CIEGOS, por Vilayanur S. Ramachandran
La investigación de las compensaciones con que el sistema visual llena vacíos en la percepción ayuda a esclarecer la forma en que procesa imágenes el cerebro.

OPTICA BINARIA, por Wilfrid B. Veldkamp y Thomas J. McHugh
La unión de la óptica y la microelectrónica ha producido lentes de finísimo espesor y conjuntos de 10.000 telescopios, cada uno de los cuales tiene el diámetro de un cabello humano.

SIMPATRIA Y COEVOLUCION ENTRE EL CRIALO Y SUS HOSPEDADORES, por Manuel Soler
La evolución del parasitismo de cría actúa como si se tratara de una carrera de armamentos. Frente a las adaptaciones de los parásitos, los hospedadores desarrollan contra-adaptaciones.

HEISENBERG, IMPRECISION Y LA REVOLUCION CUANTICA, por David C. Cassidy
A sus 32 años, Werner Heisenberg ha sido uno de los más jóvenes científicos galardonados con el premio Nobel. La ambición y una competencia furiosa le inspiraron a formular uno de los principios de la ciencia más famosos.

FUNCIONES BIOLOGICAS DEL OXIDO NITRICO, por Solomon H. Snyder y David S. Bredt
Este compuesto, escurridizo y oscuro hasta hace poco, comienza a ocupar un lugar de privilegio entre los reputados de primordial interés fisiológico. ¿Constituye acaso una nueva clase de neurotransmisores?

